

La Contingenza. Necessità, fattualità e variazione attraverso i saperi

Introduzione: Una distinzione al limite di se stessa

Vi sono distinzioni filosofiche che sopravvivono ai propri fondatori non perché siano inattaccabili, ma perché ogni tentativo di dissolverle le riproduce in forma traslata. La distinzione tra contingente e necessario appartiene a questa stirpe tenace. Aristotele la iscrive nella struttura dell'enunciato apofantico, Avicenna la trasferisce nell'ontologia della possibilità, Tommaso la converte in prova dell'esistenza divina, Hume la ridisegna come differenza tra relazioni tra idee e questioni di fatto, Kant la trascendentalizza fino a renderla quasi irriconoscibile. Eppure ogni volta che si crede di averla liquidata riaffiora, spesso sotto mentite spoglie, nell'armamentario concettuale di chi credeva di farne a meno.

Questo saggio non intende offrire una ricognizione storica di tale distinzione, né tracciarne la genealogia in forma di catalogo. L'intenzione è diversa, e più scomoda: seguire la distinzione attraverso tre domini radicalmente eterogenei — la metafisica leibniziana, la speculazione di Quentin Meillassoux e il dibattito tra paleoantropologi e biologi evoluzionisti — per verificare se essa vi funzioni sempre allo stesso modo, o se invece l'attraversamento di questi registri riveli che necessità e contingenza non sono due stati ontologici distinti bensì i poli di un continuum la cui natura rimane, essa stessa, profondamente controversa.

Il percorso impone una scelta di metodo. Ci si avvicinerà a ciascun dominio dall'interno, senza appiattirlo su una griglia precostituita, ma tenendo continuamente presente che il filo rosso è la medesima tensione: tra ciò che avrebbe potuto essere diversamente e ciò che non potrebbe non essere come è. Quando questa tensione attraversa la probabilità e la statistica, assume forme quantitative che sembrano dissolverla; quando attraversa la biologia, produce un dibattito sull'identità stessa dell'evoluzione come processo; quando attraversa la filosofia della natura di Meillassoux, finisce per rovesciarsi su se stessa, trasformando la contingenza in un nuovo tipo di necessità.

L'ipotesi di fondo, che verrà sviluppata progressivamente, è che la distinzione tra contingente e necessario non sia tanto una struttura dell'essere quanto una distinzione di postura epistemica: essa misura non una proprietà intrinseca degli eventi o delle leggi, ma il rapporto tra la finezza dell'analisi disponibile e la complessità dell'oggetto analizzato. Se questa ipotesi regge, allora Leibniz, Meillassoux, Gould e Conway Morris non parlano di cose diverse: parlano tutti della stessa cosa, ma da posizioni diverse lungo un asse comune.

Un elemento trasversale, che apparirà già nel Capitolo I e si consoliderà nei capitoli successivi, è il contributo di Saul Kripke alla distinzione modale. In *Naming and Necessity* (1980), Kripke ha mostrato che le coppie necessario/contingente e a priori/a posteriori non si sovrappongono: esistono necessità che si scoprono a posteriori — «acqua = H₂O» — e contingenze che si conoscono a priori — la convenzione del metro campione. Questa separazione non è un dettaglio tecnico della filosofia del

linguaggio; è un terzo regime modale che la tradizione leibniziana non anticipa pienamente e che la critica meillassouxiana non riesce ad aggirare con i soli strumenti che essa si è data. Introdurre Kripke come filo strutturante fin dall'inizio — invece di relegarlo, com'è consueto, a un breve cenno nella letteratura secondaria — consente di costruire una mappa più fedele del territorio e di porre l'intera discussione su basi più solide.

Capitolo I — L'architettura leibniziana: ragione sufficiente, analisi infinita e la contingenza come limite

1.1 Il principio di ragion sufficiente nella sua formulazione più esigente

Leibniz fu tra i pochi pensatori capaci di trasformare un principio metodologico in uno strumento metafisico di prima grandezza senza che il passaggio sembrasse arbitrario. Il principio di ragion sufficiente — che nulla accade senza una ragione per cui sia così piuttosto che altrimenti — non è, nella sua mente, un postulato pragmatico o un'esortazione alla ricerca causale. È una tesi sull'articolazione profonda della realtà, che coinvolge insieme la logica, l'ontologia e la teologia. Formulato nei *Principes de la nature et de la grâce* del 1714, esso afferma: «nulla avviene senza una ragione sufficiente, cioè senza che sia possibile, per chi abbia abbastanza conoscenza delle cose, rendere ragione del perché le cose stiano così e non altrimenti».

L'aggettivo «sufficiente» non è ornamentale. Esso distingue la ragione sufficiente dalla mera causa efficiente: la ragione sufficiente di un fatto è ciò che rende quel fatto *intelligibile* nella sua determinatezza, non soltanto ciò che lo produce meccanicamente. Una palla che rotola obbedisce a cause efficienti, ma la ragione sufficiente della sua traiettoria include anche il motivo per cui essa si muove in *quel* modo e non in un altro compatibile con le cause efficienti disponibili. Questo surplus di determinazione è precisamente ciò che Leibniz chiama ragione.

La struttura logica sottostante è quella della *predicazione completa*. Leibniz eredita dalla tradizione scolastica il principio secondo cui una proposizione «S è P» è vera se e soltanto se il predicato P è in qualche modo contenuto nel soggetto S. Egli lo radicalizza: per ogni sostanza individuale x, esiste un concetto individuale completo C(x) tale che, per ogni predicato P, P è vero di x se e soltanto se P è analitico rispetto a C(x). Formalmente:

$$\forall P : P \text{ è vero di } x \Leftrightarrow P \in_i C(x)$$

dove il simbolo $\in_i$ indica la relazione di inclusione concettuale (analitica). Cesare, in quanto sostanza individuale, possiede un concetto completo che include, tra le infinite determinazioni, il predicato «ha attraversato il Rubicone». Questo predicato non gli appartiene per necessità logica assoluta — Dio avrebbe potuto creare un Cesare diverso che non attraversasse il Rubicone — ma appartiene necessariamente *al concetto di questo Cesare*, al concetto dell'individuo che Dio ha effettivamente scelto di creare.

1.2 La bipartizione tra verità necessarie e verità contingenti

Su questa base logica, Leibniz costruisce la sua celebre dicotomia tra *vérités de raison* e *vérités de fait*. Le prime sono necessarie: la loro negazione è contraddittoria, e la loro dimostrazione può essere condotta in un numero finito di passi riduttivi, fino a giungere a identità del tipo « $A = A$ ». Le seconde sono contingenti: la loro negazione non è contraddittoria, e la loro dimostrazione — se fosse possibile eseguirla in modo completo — richiederebbe un'analisi infinita dei predicati coinvolti.

Il punto cruciale è qui. Consideriamo una verità necessaria come «il triangolo ha tre lati»: essa è dimostrabile in un numero finito n di passaggi:

Dimostrazione($P_{\text{necessaria}}$) $\exists n \in \mathbb{N} : \text{AnalisiPassi}(P, n) \rightarrow \text{Identità}$

Consideriamo invece una verità contingente come «Cesare ha attraversato il Rubicone»: per dimostrarla analiticamente a partire dal concetto completo di Cesare, bisognerebbe esaurire l'intera storia dell'universo sino a quel momento, poi ricostruire ogni determinazione causale e concettuale che rende quel gesto inevitabile nel quadro del mondo creato da Dio. L'analisi non si chiuderebbe mai in un numero finito di passi:

Dimostrazione($P_{\text{contingente}}$) $\forall n \in \mathbb{N} : \text{AnalisiPassi}(P, n) \rightarrow \text{ancora aperta}$

Questa distinzione tra finitezza e infinità dell'analisi è il vero cuore della contingenza leibniziana. Essa non è una distinzione ontologica tra ciò che è determinato e ciò che è indeterminato: tutto è determinato nel mondo leibniziano, poiché il principio di ragion sufficiente non ammette eccezioni. La contingenza non è assenza di ragione; è eccesso di ragione rispetto alla capacità di analisi di una mente finita. Una mente infinita — Dio — vedrebbe chiaramente come ogni fatto contingente sia derivabile analiticamente dalla natura completa degli individui e dal principio di perfezione. Per noi, l'analisi deve interrompersi prima di esaurirsi, e questa interruzione forzata è ciò che sperimentiamo come contingenza.

Questa posizione ha un'implicazione profonda e spesso sottovalutata: la contingenza non è una proprietà del mondo in se stesso, ma una relazione tra il mondo e la mente che tenta di comprenderlo. Non vi sono fatti intrinsecamente contingenti; vi sono fatti la cui ragione sufficiente eccede la capacità analitica di chi li considera. La contingenza è, in senso rigoroso, *epistemica*.

1.3 I mondi possibili e il principio di perfezione

Ma il resoconto leibniziano della contingenza non si esaurisce nella distinzione logica tra analisi finita e analisi infinita. Esso include un secondo livello, di natura teologica e modale, che riguarda il rapporto tra il mondo attuale e i mondi possibili.

Nell'intelletto divino coesistono infiniti mondi possibili, ciascuno dei quali è internamente coerente e privo di contraddizioni. Ogni mondo possibile è una combinazione diversa di individui possibili con i loro concetti completi. Dio non è vincolato a creare questo mondo piuttosto che un altro da nessuna necessità logica assoluta: la creazione è un atto di volontà libera che segue il *principio del meglio* (*principium optimorum*, o principio di perfezione). Tra tutti i mondi possibili, Dio sceglie quello che massimizza la perfezione, dove la perfezione è intesa come rapporto tra la varietà delle essenze realizzate e la semplicità delle leggi che le governano.

Dal punto di vista formale, se indichiamo con W l'insieme di tutti i mondi possibili e con $\Phi(w)$ la misura di perfezione del mondo w , allora il mondo attuale w^* è quello per cui:

$$w^* = \operatorname{argmax}_{\{w \in W\}} \Phi(w)$$

dove Φ è una funzione che cresce sia con la *varietà* dei fenomeni che con la *semplicità* delle leggi. Leibniz non formalizza questo in termini matematici espliciti, ma la struttura è quella di un problema di ottimizzazione vincolata: massimizzare il contenuto di realtà soggetto al vincolo della coerenza interna e della semplicità nomologica.

Questo secondo livello del resoconto introduce una forma di necessità relativa: una volta che Dio ha scelto il principio di perfezione come criterio di scelta, e una volta che quel criterio seleziona univocamente questo mondo, ogni evento in esso è necessario *ex hypothesi*, cioè necessario dato che il mondo attuale è questo mondo. Ma rimane contingente *in senso assoluto*, perché Dio avrebbe potuto scegliere altrimenti — avrebbe potuto, cioè, applicare un diverso principio di valutazione, oppure addirittura creare un mondo meno perfetto per ragioni imperscrutabili alla ragione umana.

La contingenza leibniziana ha dunque una struttura *stratificata*: vi è la contingenza logica (ciò che non è contraddittorio negare), la contingenza analitica (ciò la cui verità richiede un'analisi infinita), e la contingenza modale relativa (ciò che è vero nel mondo attuale ma non in tutti i mondi possibili). Queste tre strati si sovrappongono ma non si identificano perfettamente, e la loro interazione produce una delle architetture modali più raffinate della storia della filosofia.

1.3b La critica di Arnauld e il problema dell'identità personale

Il carteggio tra Leibniz e Antoine Arnauld, sviluppatosi tra il 1686 e il 1690, costituisce il banco di prova più rigoroso della dottrina dei concetti completi. Arnauld identifica immediatamente la difficoltà: se il concetto completo di Adamo include l'aver peccato, allora Dio, nel creare Adamo, ha inevitabilmente creato un peccatore. La contingenza del peccato originale sembra compromessa.

Leibniz risponde distinguendo tra il peccato come predicato di *questo* Adamo (necessario rispetto al suo concetto) e il fatto che Dio abbia scelto di creare *questo* Adamo piuttosto che un Adamo-senza-peccato (contingente rispetto alla libertà divina). Ma Arnauld insiste: nel momento in cui Dio delibera quale Adamo creare, ogni «Adamo possibile» ha il suo concetto completo che include o esclude il peccato, e Dio non può scegliere di creare *questo* Adamo dandogli un comportamento diverso da quello inscritto nel suo concetto. Il problema che emerge — l'identità trans-mondana degli individui — è precisamente quello che Kripke affronterà tre secoli dopo: in che senso l'Adamo del mondo possibile W_1 (che pecca) è *lo stesso* individuo dell'Adamo del mondo W_2 (che non pecca)? Leibniz tende a identificare gli individui con i loro concetti completi, il che rende impossibile il controfattuale «questo stesso individuo avrebbe potuto agire diversamente». La contingenza leibniziana è, in ultima istanza, la contingenza della scelta divina tra individui diversi — non la contingenza del comportamento di un medesimo individuo.

1.3c Spinoza come contraltare: la necessità assoluta di ogni cosa

La posizione leibniziana sulla contingenza diventa più nitida se la si confronta con quella di Spinoza, il cui sistema porta alle conseguenze più radicali la stessa tradizione razionalista e costituisce il principale avversario implicito della metafisica di Leibniz. Nell'*Ethica* (1677), Spinoza afferma che non vi è nulla di contingente nell'essere: «dalla necessità della natura divina devono derivare infinite cose in infiniti modi» (E I, P16). La sostanza unica (*Deus sive Natura*) è causa sui, e la sua essenza implica necessariamente l'esistenza. Tutto ciò che esiste è un modo della sostanza unica e deriva dalla sua essenza con necessità assoluta. La contingenza, per Spinoza, è soltanto il riflesso dell'ignoranza umana: «una cosa si dice contingente rispetto al difetto della nostra conoscenza» (E IV, Praef).

Leibniz non poteva accettare questa posizione per ragioni teologiche (un Dio necessitato non è un Dio libero) e morali (un universo necessario non lascia spazio alla grazia o alla responsabilità). Ma il prezzo che Leibniz paga per preservare la contingenza è considerevole: deve introdurre una pluralità di mondi possibili e un principio di scelta (il principio di perfezione) che, se non è esso stesso necessario, non può bloccare la domanda «perché questo principio piuttosto che un altro?», e se è necessario, reintroduce una forma di spinozismo al livello dei meta-principi.

La posizione di Meillassoux può essere letta, in questa prospettiva, come un'inversione dello spinozismo: dove Spinoza nega la contingenza per affermare la necessità assoluta di tutto, Meillassoux nega la necessità per affermare la contingenza assoluta di tutto. Entrambi producono una metafisica monista e radicale; si differenziano nel segno. Questa speculare radicalità suggerisce che entrambe le posizioni siano poli ideali, e che la realtà empirica — come la statistica e la biologia mostrano — si collochi sistematicamente nella zona media del gradiente che le separa.

1.4 La necessità implicita nel contingente: il problema della libertà

Uno degli aspetti più tormentati della metafisica leibniziana riguarda la compatibilità tra il principio di ragion sufficiente e la libertà umana. Se ogni atto di Cesare è incluso analiticamente nel suo concetto completo, e se il concetto completo di Cesare è eternamente presente nell'intelletto divino, in che senso Cesare è *libero* di attraversare o non attraversare il Rubicone?

Leibniz risponde distinguendo tra necessità assoluta e necessità morale. La necessità assoluta è quella delle verità di ragione: la sua negazione è contraddittoria. La necessità morale è quella con cui un agente saggio e buono — Dio, ma anche l'essere umano nella misura in cui agisce razionalmente — è determinato dal meglio. Cesare non è *assolutamente* costretto ad attraversare il Rubicone, perché un Cesare diverso (un individuo diverso con un concetto diverso) avrebbe potuto non farlo. Ma questo Cesare, con questo carattere, questi desideri, questa storia, è *moralmente necessitato* a compiere quell'atto: agire diversamente sarebbe stato in contraddizione con la sua natura profonda.

Questa risposta è insoddisfacente per molti commentatori, e lo era già per Arnauld, il grande interlocutore epistolare di Leibniz. Se il concetto completo di Cesare include

eternamente tutti i suoi predicati, anche quelli futuri, allora la sequenza causale che porta all'attraversamento del Rubicone è già scritta nella struttura concettuale dell'individuo prima ancora che l'individuo esista. La libertà, in questo quadro, sembra ridursi all'ignoranza: Cesare è libero perché non sa che il suo concetto completo lo vincola. Ma l'ignoranza è una spiegazione della *pervezione* di libertà, non della libertà stessa.

Il problema tocca direttamente la questione della contingenza. Se la necessità morale è una forma di necessità — seppur più debole di quella logica assoluta — allora la contingenza degli atti umani è contingenza soltanto rispetto alla necessità assoluta, ma non rispetto alla totalità delle determinazioni causali e concettuali che li producono. Il mondo leibniziano è un mondo in cui tutto è, in un senso molto preciso, *come non potrebbe non essere*, almeno data la scelta di Dio di creare questo mondo piuttosto che un altro.

È questa struttura — la contingenza come mera incompletezza dell'analisi, sovrapposta a una necessità di fondo che governa ogni determinazione — che Meillassoux troverà inaccettabile e che si proporrà di smantellare dalle fondamenta.

1.5 La necessità a posteriori come terzo registro: un'anticipazione kripkiana

Prima di passare alla critica meillassouxiana, è necessario introdurre un terzo registro modale che la bipartizione leibniziana tra verità di ragione e verità di fatto non riesce a catturare pienamente, e che risulterà strutturante per l'intera analisi che segue. Si tratta della distinzione introdotta da Saul Kripke in *Naming and Necessity* (1980) tra la dimensione metafisica della modalità (necessario/contingente) e la dimensione epistemica dell'accesso (a priori/a posteriori).

Leibniz — come tutta la tradizione che va da lui fino a Kant — presupponeva una sostanziale coincidenza tra queste due dimensioni: le verità di ragione sono necessarie e conoscibili a priori; le verità di fatto sono contingenti e conoscibili solo a posteriori. Kripke dimostra che questa coincidenza è un'illusione prodotta da una sovrapposizione illegittima di due distinzioni indipendenti. Le combinazioni effettivamente possibili sono quattro, non due:

	A priori	A posteriori
Necessario	Verità logiche e analitiche	«Acqua = H ₂ O», «Hesperus = Phosphorus»
Contingente	Convenzione del metro campione	Verità empiriche ordinarie

Il caso filosoficamente più potente è quello delle *necessità a posteriori*. La proposizione «l'acqua è H₂O» è stata scoperta empiricamente — richiede indagine chimica — ma, una volta scoperta, risulta vera in tutti i mondi possibili in cui l'acqua esiste. L'argomento di Kripke si fonda sul concetto di *designatore rigido*: un termine singolare che si riferisce al medesimo oggetto in tutti i mondi possibili in cui quell'oggetto esiste. «Acqua» è un designatore rigido: esso designa, in ogni mondo possibile, la stessa sostanza — quella sostanza che nel mondo attuale abbiamo scoperto essere H₂O. Da ciò segue che non vi è un mondo possibile in cui l'acqua esiste ma non è H₂O; ciò che in un mondo diverso avesse le stesse proprietà macroscopiche dell'acqua (trasparente,

potabile, liquida a certe temperature) ma non fosse H₂O sarebbe una sostanza diversa — la *Twin Earth water* dell'esperimento mentale di Putnam (1973) — non acqua.

Questo regime introduce una forma di necessità che sfugge alla dicotomia leibniziana. Non si tratta di una verità di ragione (la sua negazione non implica contraddizione formale, almeno non prima della scoperta chimica); né di una semplice verità di fatto contingente (una volta identificata la natura dell'acqua, non vi è mondo possibile in cui l'acqua sia qualcos'altro). È una necessità che risiede nell'*essenza* degli oggetti reali — la loro struttura interna, la loro composizione, la loro identità — e che può essere scoperta solo attraverso l'esperienza, non dedotta a priori dalla struttura concettuale.

Questa concezione ha conseguenze dirette sulla critica a Leibniz. Il principio di ragion sufficiente leibniziano presuppone che la necessità si radichi nei concetti: un fatto è necessario se il suo predicato è analitico rispetto al soggetto, e la necessità è sempre — almeno in linea di principio — leggibile nell'analisi del concetto. La necessità essenziale kripkiana rompe questo nesso: «acqua = H₂O» non è analitica rispetto al concetto ordinario di acqua (chi capisce il significato della parola «acqua» non sa automaticamente che è H₂O), eppure è necessaria. Vi sono dunque necessità che non derivano dall'analisi concettuale leibniziana, ma dall'identità degli oggetti reali. Leibniz non aveva gli strumenti per riconoscere questo terzo regime, e la sua architettura modale ne risulta strutturalmente incompleta.

La ragione per cui questa distinzione risulta strutturante per il presente saggio è triplice. In primo luogo, essa complica la posizione leibniziana rendendola più vulnerabile di quanto Leibniz stesso riconosca: se vi sono necessità che si scoprono a posteriori, allora l'analisi infinita dei concetti completi non esaurisce la struttura del necessario; esistono vincoli reali sull'essere che non derivano dalla struttura concettuale ma dalla costituzione fisica degli oggetti. In secondo luogo, essa offre uno strumento per formalizzare la tesi di Conway Morris sulla convergenza evolutiva: le strutture biologiche più efficienti potrebbero essere «necessarie a posteriori» nel senso di Kripke — scoperte empiricamente ma non modificabili date le leggi della fisica e della chimica. In terzo luogo, essa segna un limite preciso alla critica meillassouxiana: Meillassoux nega che vi siano necessità genuine a livello delle leggi fisiche, ma la necessità kripkiana a posteriori non dipende dalla struttura delle leggi come tali, bensì dall'identità degli oggetti; e questa dipendenza è più sottile di quanto la strategia meillassouxiana riesca a smontare.

1.6 L'eredità leibniziana: la ragion sufficiente come presupposto tacito

Prima di passare alla critica meillassouxiana, vale la pena notare quanto profondamente il principio di ragion sufficiente abbia permeato il pensiero scientifico moderno al di là della metafisica esplicita. Ogni spiegazione scientifica che risponde alla domanda «perché questo e non altro?» implica, almeno operativamente, una versione del principio di ragion sufficiente. Quando la fisica teorica ricerca una teoria del tutto che derivi *necessariamente* il valore delle costanti fondamentali — la costante di struttura fine $\alpha \approx 1/137$, la massa del protone, la costante cosmologica — essa persegue esattamente il programma leibniziano di ridurre le contingenze apparenti a necessità più profonde.

La cosmologia degli universi multipli, nelle sue diverse declinazioni, può essere letta come un'estensione naturalistica della teologia leibniziana dei mondi possibili: se esistono infiniti universi con parametri diversi, allora la domanda «perché *questo* universo?» viene ricondotta a un principio selettivo (il principio antropico, nella sua versione forte o debole) che funziona analogamente al principio di perfezione. Non è Dio a scegliere il mondo migliore, ma la selezione avviene attraverso la struttura stessa della multiverso e le condizioni necessarie per l'esistenza di osservatori.

Questa persistenza del programma leibniziano al di fuori della metafisica esplicita è ciò che rende la critica di Meillassoux non soltanto un episodio di storia della filosofia, ma una sfida al presupposto più radicato del pensiero scientifico contemporaneo.

Il saggio attraversa in poche pagine il salto che separa Leibniz da Meillassoux, tre secoli nei quali il problema della necessità ha subito trasformazioni radicali che non sono un semplice sfondo storico, ma costituiscono i presupposti senza i quali la critica meillassouxiana al principio di ragion sufficiente non può essere né compresa nella sua portata né valutata nella sua debolezza strutturale. Quattro momenti di questa storia meritano un trattamento autonomo: la dissoluzione humeana della necessità causale; la risposta kantiana che trascendentalizza la necessità invece di negarla; il dibattito novecentesco tra la teoria della regolarità e il necessitarismo nomologico; e la teoria delle disposizioni, che offre una via alternativa a entrambi e che la critica di Meillassoux non riesce a intaccare con i soli strumenti che essa si è data.

1.7 Hume e la dissoluzione della necessità causale

David Hume è l'autore che, con maggiore radicalità di chiunque altro prima di Meillassoux, ha posto in questione il fondamento della necessità nomologica. La sua analisi nell'*Enquiry Concerning Human Understanding* (1748) e nel *Treatise of Human Nature* (1739–40) parte da una premessa epistemica: nessuna connessione necessaria tra causa ed effetto è mai oggetto di impressione sensibile. Possiamo osservare che A è seguito da B ripetutamente; non osserviamo mai la necessità di questa sequenza. La «connessione necessaria» che attribuiamo alle relazioni causali non è una proprietà dell'essere ma un'abitudine della mente: la ripetizione delle sequenze produce un'aspettativa, e questa aspettativa viene proiettata sul mondo sotto forma di necessità.

La struttura dell'argomento humeano è precisa e non riducibile a scetticismo ingenuo. Hume distingue due tipi di relazioni tra idee: le relazioni che dipendono esclusivamente dal contenuto delle idee stesse (relazioni geometriche, aritmetiche, logiche) e le questioni di fatto, la cui negazione è sempre concepibile senza contraddizione. Ogni proposizione causale — «il fuoco scalda», «il sole sorge ogni mattina» — appartiene al secondo tipo: è possibile immaginare, senza contraddizione logica, un mondo in cui il fuoco non scalda o il sole non sorge. La necessità causale non è necessità logica.

Questa posizione è l'antenato diretto del principio di fatticità di Meillassoux. La differenza strutturale è tuttavia significativa: Hume conclude alla contingenza delle leggi causali come limite epistemico (non possiamo dimostrarne la necessità), mentre Meillassoux conclude alla contingenza ontologica delle leggi come struttura dell'assoluto (le leggi sono contingenti, non soltanto non-dimostrabili come necessarie). Hume avrebbe considerato questo passaggio come un'affermazione

dogmatica: per lui, né la necessità né la contingenza ontologica delle leggi fisiche è dimostrabile; la ragione si arresta davanti a entrambe.

Il contributo humeano è tuttavia indispensabile per contestualizzare il dibattito successivo: senza di esso, il necessitarismo nomologico del Novecento non avrebbe un avversario definito, e la stessa critica di Meillassoux al principio di ragion sufficiente mancherebbe del suo punto di partenza. La posizione humeana — che le leggi fisiche siano generalizzazioni sulle regolarità osservate, prive di fondamento necessario — è precisamente quella che Armstrong, Tooley e Dretske cercheranno di confutare, e che Meillassoux assumerà, radicalizzandola, come propria.

1.8 Kant: la necessità come struttura trascendentale

La risposta kantiana all'argomento humeano non è una difesa della necessità ontologica delle leggi fisiche, ma qualcosa di più sottile e, sotto molti aspetti, più difficile da smontare: la trasformazione della necessità da proprietà del mondo a struttura dell'esperienza. La necessità causale non è nell'oggetto ma nella forma con cui la mente struttura l'esperienza: la categoria di causa ed effetto è una delle dodici categorie dell'intelletto puro che rendono possibile l'esperienza come tale. Ogni evento è esperito come causato non perché il mondo sia necessariamente causale, ma perché la mente non può esperire eventi altrimenti.

La strategia kantiana ha una conseguenza diretta per il problema della contingenza: essa sposta la domanda «le leggi fisiche sono necessarie?» nella domanda «le strutture dell'esperienza sono necessarie?». La risposta kantiana alla seconda domanda è affermativa in senso trascendentale: le categorie sono necessarie come condizioni di possibilità dell'esperienza, anche se non sono necessarie in senso logico assoluto (la loro negazione non produce contraddizione formale, ma produce l'impossibilità dell'esperienza come tale). La necessità trascendentale è un terzo tipo di necessità, distinto dalla necessità logica (Leibniz) e dalla necessità nomologica (le leggi fisiche del necessitarismo): è la necessità delle condizioni che rendono possibile qualsiasi esperienza.

Meillassoux identifica questa postura con il correlazionismo e la critica dall'interno: se le strutture dell'esperienza sono esse stesse fattuali — se avrebbero potuto essere diverse — allora la necessità trascendentale è semplicemente un'illusione prodotta dal fatto che non possiamo stare fuori dalle nostre strutture cognitive per valutarne l'alterità. Il problema con questa critica è che essa non tiene conto della distinzione kantiana tra validità obiettiva delle categorie (validità entro il dominio dell'esperienza possibile) e validità ontologica (validità per le cose in sé). Kant non afferma che le leggi fisiche siano necessarie; afferma che la struttura causale dell'esperienza è necessaria come condizione dell'esperienza stessa. La critica di Meillassoux colpisce efficacemente la tesi che vi sia una necessità della struttura dell'esperienza in assoluto; ma non colpisce la tesi più modesta che quella struttura sia necessaria per il tipo di esperienza che abbiamo — tesi che non implica alcuna affermazione sulla struttura dell'essere in sé.

La rilevanza di questa distinzione per il continuum $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ è precisa: la necessità trascendentale kantiana corrisponde a un valore di N che è massimo entro il dominio dell'esperienza ($N = 1$ per le categorie date $\Sigma =$ scala dell'esperienza umana) ma indeterminato per $\Sigma =$ scala dell'essere in sé. La critica meillassouxiana si dirige contro

la proiezione del valore $N = 1$ dall'interno dell'esperienza all'esterno di essa; la risposta kantiana è che questa proiezione non è mai stata effettuata — le categorie sono necessarie per l'esperienza, non per l'essere. Il dibattito tra Kant e Meillassoux è, in questa prospettiva, un disaccordo sul dominio del parametro Σ , non sulla struttura di N .

1.9 Il dibattito novecentesco: Armstrong, Tooley, Dretske e il necessitarismo nomologico

Il dibattito più direttamente rilevante per la critica meillassouxiana al principio di ragion sufficiente è quello che si è sviluppato nella filosofia analitica anglosassone tra gli anni Settanta e Novanta sul fondamento delle leggi di natura. La posizione humeana — le leggi come generalizzazioni contingenti sulle regolarità — era stata difesa con strumenti sofisticati da David Lewis attraverso la sua teoria dei Migliori Sistemi (Best System Account, BSA): una legge di natura è un enunciato che appartiene al sistema di assiomi che bilancia in modo ottimale semplicità e forza informativa rispetto all'insieme dei fatti particolari. Le leggi sono contingenti perché il sistema di fatti particolari avrebbe potuto essere diverso.

David Armstrong, Michael Tooley e Fred Dretske proposero indipendentemente, tra il 1977 e il 1983, una posizione alternativa che è diventata nota come necessitarismo nomologico: le leggi di natura non sono generalizzazioni sui fatti particolari ma relazioni necessarie tra universali. L'enunciato «tutti i corvi sono neri» non è una legge se è soltanto vero di tutti i corvi esistenti; è una legge se esprime il fatto che l'universale corvo-ità necessita l'universale-nerezza in ogni istanza. Questa necessità non è necessità logica (l'esistenza di corvi non neri non è contraddittoria in senso formale) ma necessità nomologica: una forma di necessità che governa le istanziazioni degli universali nel mondo fisico.

La struttura formale del necessitarismo armstrongiano può essere espressa come segue. Siano F e G due universali di primo ordine (proprietà). Una legge di natura «tutti gli F sono G » non afferma:

$$\forall x : F(x) \rightarrow G(x) \text{ [generalizzazione contingente]}$$

ma piuttosto:

$$N(F, G) \text{ [relazione di necessitazione tra universali]}$$

dove N è un universale di secondo ordine — una relazione tra universali — che è connessa agli enunciati particolari attraverso il principio:

$$N(F, G) \rightarrow \forall x : F(x) \rightarrow G(x)$$

ma non viceversa. La relazione $N(F, G)$ è contingente in senso assoluto (avrebbe potuto non valere in un mondo diverso), ma in ogni mondo in cui vale, essa necessita che ogni istanza di F sia anche istanza di G . Questo crea una struttura bimodale: contingenza della relazione tra universali (al livello dei mondi possibili), necessità della connessione tra particolari (al livello delle istanze entro un mondo).

Questa struttura bimodale è di grande rilevanza per il continuum N . Il necessitarismo armstrongiano afferma che le leggi fisiche hanno $N = 1$ nel senso nomologico (dato che $N(F, G)$ vale, ogni istanza di F è necessariamente G) ma $N < 1$ nel senso modale assoluto ($N(F, G)$ è contingente tra i mondi possibili). Meillassoux critica il primo aspetto — la necessità nomologica — ma non affronta la distinzione di Armstrong tra il livello dei universali e il livello dei particolari. La critica meillassouxiana al PSR si

dirige contro l'assunzione che vi sia una ragione per cui $N(F, G)$ vale in questo mondo; ma Armstrong non afferma che vi sia tale ragione — la relazione tra universali è contingente anche per lui. Il bersaglio di Meillassoux è la necessità nomologica all'interno di un mondo, non la necessità della scelta del mondo.

1.10 Le disposizioni come necessità immanente: Bird e Mumford

Una posizione più radicale è quella dei teorici delle disposizioni, rappresentata in modo particolarmente preciso da Alexander Bird in *Nature's Metaphysics* (2007) e da Stephen Mumford in *Laws in Nature* (2004). Secondo questa posizione, le proprietà fisiche sono essenzialmente disposizionali: la massa, la carica, il momento di spin non sono proprietà categoriali (proprietà che potrebbero, in linea di principio, essere collegate a qualsiasi tipo di comportamento causale) ma disposizioni intrinseche che necessitano il comportamento che esibiscono. La carica elettrica è essenzialmente la disposizione a esercitare forza sulle altre cariche secondo la legge di Coulomb; non si tratta di una proprietà categoriale che contingentemente produce questo comportamento, ma di una proprietà che è, nella sua identità, il produttore di questo comportamento.

Questa posizione ha una conseguenza radicale per il problema delle leggi di natura: le leggi non sono relazioni tra universali esternamente imposte (Armstrong) né generalizzazioni contingenti sui fatti (Lewis), ma espressioni dell'identità essenziale delle proprietà stesse. La legge di Coulomb non potrebbe essere diversa in un mondo in cui esistano cariche elettriche; essere carica elettrica è essere la disposizione descritta dalla legge di Coulomb. Le leggi fisiche sono, in questo quadro, necessarie a posteriori nel senso di Kripke: scoperte empiricamente, ma necessarie nell'identità delle proprietà che descrivono.

La teoria delle disposizioni offre una risposta alla critica meillassouxiana che il saggio non ha sviluppato. Meillassoux attacca la necessità nomologica affermando che le leggi fisiche avrebbero potuto essere diverse — che nulla impedisce, in linea di principio, alle costanti fondamentali di cambiare. La teoria delle disposizioni risponde che questa possibilità, se interpretata come possibilità reale, comporta la possibilità che le proprietà fisiche siano diverse: un mondo in cui la carica non seguisse la legge di Coulomb sarebbe un mondo in cui non esistono cariche elettriche nel senso in cui le conosciamo, ma qualcosa di categorialmente diverso che condivide soltanto il nome. La contingenza meillassouxiana delle leggi fisiche collassa, nella prospettiva disposizionale, nella necessità kripkiana dell'identità delle proprietà: le leggi non sono contingenti nel senso di modificabili mantenendo inalterate le proprietà, perché le proprietà e le leggi sono inscindibili.

Questa connessione tra la teoria delle disposizioni e la necessità kripkiana a posteriori arricchisce il «quinto tipo di necessità» identificato nell'Appendice E del saggio. Le proprietà fisiche — carica, massa, spin — sono designatori rigidi nel senso di Kripke: esse si riferiscono, in ogni mondo possibile in cui esistono, alle stesse entità con le stesse strutture essenziali. Le leggi fisiche che descrivono il comportamento di queste proprietà sono necessarie a posteriori: scoperte empiricamente, ma necessarie nell'identità delle proprietà stesse. La critica di Meillassoux al PSR è efficace contro la

versione leibniziana della necessità nomologica, ma non contro la versione kripkiano-disposizionale, che opera a un livello diverso.

Capitolo II

Meillassoux e la necessità della contingenza: verso una fattualità assoluta

2.1 Il correlazionismo e il suo limite interno

Quentin Meillassoux costruisce la propria argomentazione su una diagnosi della modernità filosofica che è essa stessa un atto speculativo di prima grandezza. Egli chiama *correlazionismo* la postura filosofica inaugurata da Kant e portata a varie estremizzazioni dal pensiero post-kantiano: la tesi, implicita o esplicita, che il pensiero non abbia mai accesso a un essere *in sé*, separato dal suo rapporto con una mente che lo pensa, una struttura che lo anticipa, un linguaggio che lo articola. Ogni pensiero pensa qualcosa; ogni qualcosa è sempre già pensato-da; la correlazione tra il pensiero e il suo correlato è il dato primitivo e insuperabile da cui non si può evadere senza ricadere in un dogmatismo precritico.

Questa postura non è attribuita da Meillassoux solo ai kantiani in senso stretto. Fenomenologia husserliana, ontologia heideggeriana, filosofia analitica del linguaggio ordinario, pragmatismo: tutti condividono, pur nelle loro differenze, il rifiuto di un accesso non mediato alla realtà in se stessa. Il correlazionismo è il paradigma implicito dell'intera filosofia accademica del Novecento.

La mossa di Meillassoux non è quella di negare ingenuamente il correlazionismo per tornare a un realismo dogmatico precritico. Egli prende sul serio l'argomentazione kantiana e la porta alle sue conseguenze più radicali. Il punto d'attacco è la *fatticità* della correlazione stessa: il fatto che la correlazione tra pensiero ed essere sia strutturata in un determinato modo — che le categorie dell'intelletto siano queste e non altre, che le forme a priori dell'intuizione siano spazio e tempo e non qualcos'altro — non può essere giustificato da nessuna necessità ulteriore. La correlazione è fattuale: potrebbe essere diversa. Questa fatticità è, per il correlazionista coerente, un limite invalicabile: non possiamo sapere *perché* le strutture del pensiero sono quelle che sono, perché ogni risposta a questa domanda sarebbe già formulata all'interno di quelle strutture.

Meillassoux vede in questa fatticità non un muro ma una finestra. Se la correlazione potrebbe essere diversa — se essa è intrinsecamente contingente — allora la contingenza non è una proprietà epistemica (il limite della nostra ignoranza) ma una proprietà ontologica dell'essere stesso. Il punto è formulato con precisione nel passaggio centrale di *Après la finitude*: non è che noi *non sappiamo* se le strutture del pensiero avrebbero potuto essere altrimenti; è che esse *avrebbero* potuto essere altrimenti, e il correlazionismo stesso, per restare coerente, deve ammetterlo.

2.1b Le «prove ancestrali» come motivazione del progetto

Prima di procedere all'analisi dell'argomentazione centrale, è importante comprendere la motivazione che Meillassoux adduce per il proprio progetto. Egli chiama «enunciati ancestrali» (*énoncés ancestraux*) le proposizioni scientifiche che riguardano eventi

accaduti prima dell'emergenza di qualsiasi forma di vita capace di esperienza: la datazione della formazione della Terra (4,56 miliardi di anni fa), l'età dell'universo (13,8 miliardi di anni), le proprietà fisiche del cosmo primordiale. Queste proposizioni sono enunciate dalla scienza con grande precisione e solidità empirica; esse riguardano però oggetti che per definizione non potevano essere «correlati» a nessuna struttura cognitiva — non vi erano menti che li esperissero.

Il problema per il correlazionista è questo: come dare senso agli enunciati ancestrali se ogni oggetto di conoscenza è sempre-già correlato a un soggetto? Le risposte disponibili — che gli enunciati ancestrali descrivono ciò che un soggetto *avrebbe potuto* esperire se fosse stato presente, oppure che essi sono espressi in termini di strutture matematiche intersoggettivamente condivisibili — sembrano a Meillassoux aggirare il problema piuttosto che risolverlo. Un universo che «sarebbe stato» così-e-così non è lo stesso dell'universo che «era» così-e-così: la temporalità reale del passato antecedente alla coscienza sfugge alla grammatica del correlazionismo. Questa motivazione non è nuova — diverse versioni del realismo scientifico l'hanno sviluppata contro l'idealismo — ma la sua collocazione nel progetto di Meillassoux è strategicamente importante: essa mostra che il correlazionismo non è soltanto problematico in astratto, ma conduce a conseguenze contrintuitive rispetto alla pratica scientifica effettiva.

2.5b Cartesio come parallelo inverso: la certezza come assoluto

C'è un parallelo strutturale non ovvio tra il progetto di Meillassoux e quello di Descartes nelle *Meditationes* (1641): entrambi cercano un assoluto accessibile alla ragione dopo aver demolito il terreno del senso comune. Descartes trova l'assoluto nella certezza del cogito — un punto fermo indubitabile a partire da cui ricostruire la conoscenza. Meillassoux trova l'assoluto nella contingenza della correlazione — un punto fermo pensabile a partire da cui articolare la struttura dell'essere al di là della correlazione.

La differenza è che il cogito cartesiano è un assoluto epistemico (la certezza di un atto di pensiero) mentre la fatticità meillassouxiana è un assoluto ontologico (la struttura contingente dell'essere). Ma entrambi compiono la medesima mossa strutturale: usano l'atto della riflessione critica — l'esame rigoroso dei limiti del pensiero — per scoprire all'interno di quei limiti qualcosa che li trascende. Cartesio scopre che dubitare presuppone il pensiero; Meillassoux scopre che la fatticità del pensiero presuppone la contingenza dell'essere.

Il parallelo si spinge più in là. Cartesio ha bisogno di Dio per garantire la verità della ragione e la corrispondenza tra l'intelletto e il mondo. Meillassoux non ha Dio, ma ha il «Dio che potrebbe venire» — il deus ex nihilo che potrebbe emergere dall'ipercaos come evento contingente di seconda generazione. Questo «Dio futura» non è un fondamento della necessità ma una possibilità della contingenza: la possibilità che dall'assenza di necessità emerga, un giorno, qualcosa di assolutamente inatteso. È il Dio dell'*après la finitude* non dell'*avant* — non il Dio che spiega perché il mondo è così, ma il Dio che potrebbe trasformarlo in qualcosa di radicalmente altro.

2.2 Dall'ipotesi fatticità alla necessità assoluta della contingenza

L'argomentazione meillassouxiana procede con una mossa dialettica di notevole eleganza. Il correlazionista forte — quello che afferma non solo che non possiamo conoscere le cose in sé, ma che nemmeno possiamo affermarne la possibilità coerente — si trova in una posizione instabile. Se ogni cosa, inclusa la correlazione, è fattuale e contingente, allora anche l'affermazione della necessità della correlazione è contingente. Ma se è contingente, allora potrebbe non essere necessaria, e se potrebbe non essere necessaria, allora la correlazione non è, in fondo, necessaria.

Questo ragionamento, che può sembrare un gioco di parole, ha in realtà una struttura modale precisa. Definiamo:

$\Box P :=$ "P è necessariamente vero"

$\Diamond P :=$ "P è possibilmente vero"

$\neg P :=$ "P è falso"

Il principio di ragion sufficiente (PSR) afferma, nella sua forma modale:

PSR: $\forall P : P \rightarrow \Box P$ (ogni fatto ha una ragione sufficiente che lo rende necessario)

Il correlazionista forte non accetta il PSR — nessuno dopo Kant lo accetta in quella forma — ma sostiene:

$\Box(\text{Correlazione})$ ovvero: la struttura correlazionale è necessaria

Meillassoux risponde: da dove viene questa necessità? Se non dal PSR (che è stato abbandonato), allora non può essere dimostrata. La necessità della correlazione è essa stessa fattuale:

$\Diamond \neg(\text{Correlazione})$

Ma se la struttura correlazionale potrebbe essere altrimenti, allora le leggi del pensiero, le strutture categoriali, i vincoli della razionalità potrebbero essere diversi da come sono. E se potrebbero essere diversi, allora non vi è ragione di assumere che il mondo *dovrebbe* avere la struttura che abbiamo proiettato su di esso attraverso la correlazione.

Da qui, la mossa più ardita: la sola cosa che non può essere contingente è la *contingenza stessa*. Se affermiamo che la contingenza è contingente — che potrebbe darsi un essere necessario che contenga in sé la ragione della propria esistenza — incorriamo in una contraddizione performativa: per dimostrare che la contingenza è contingente, dovremmo mostrare che *potrebbe darsi la necessità*, ma questa possibilità è già una forma di contingenza. La contingenza non può essere eliminata dall'orizzonte dell'essere, non perché lo affermi un dogma, ma perché ogni tentativo di eliminarla la presuppone.

La formulazione modale di questo risultato, che Meillassoux chiama *principio di fatticità* (PF) in sostituzione del PSR, è:

PF: $\Box(\forall x : \Diamond(x \text{ è altrimenti}))$

Ogni ente è contingente: necessariamente, ogni cosa avrebbe potuto essere diversa da come è. La necessità opera a un meta-livello: non è la necessità di questo o quel fatto, ma la necessità che nessun fatto sia necessario.

2.3 L'ipercaos e la sua struttura: contingenza senza probabilità

Le conseguenze di questo risultato sono radicali e, per molti aspetti, controintuitive. Se le leggi della fisica non hanno una ragione sufficiente, esse avrebbero potuto essere

diverse. Ma se avrebbero potuto essere diverse, potrebbero anche *diventare* diverse: le costanti fondamentali potrebbero cambiare, le leggi della termodinamica potrebbero cessare di valere, la logica stessa potrebbe subire trasformazioni. Meillassoux chiama questo sfondo ontologico *ipercaos*: un caos che precede e rende possibili tutte le strutture, compresi i principi logici che di solito trattiamo come vincoli inviolabili del pensiero.

L'obiezione più immediata è probabilistica: se i cambiamenti delle leggi fisiche fossero possibili, non li osserveremmo con probabilità altissima? Il fatto che le leggi fisiche si mostrino stabili non è forse una prova empirica della loro necessità, o almeno della loro altissima improbabilità di cambiamento?

Meillassoux risponde con un argomento che utilizza la teoria degli insiemi di Cantor, e in particolare il teorema sull'inesistenza di un insieme universale. L'argomento si articola come segue. Per applicare il calcolo delle probabilità a un fenomeno, è necessario poter definire uno spazio di campionamento Ω — un insieme di tutti gli esiti possibili — e una σ -algebra su di esso. La probabilità che le leggi fisiche rimangano stabili rispetto a tutte le loro possibili variazioni richiede che l'insieme di tutte le possibili configurazioni nomologiche dell'universo sia un insieme *totalizzabile*, ovvero che esso costituisca un insieme ben definito nel senso della teoria degli insiemi standard.

Il teorema di Cantor afferma che per qualsiasi insieme S , la cardinalità del suo insieme delle parti (insieme potenza) è strettamente maggiore della cardinalità di S :

$$|\mathcal{P}(S)| > |S|$$

Questo implica che non esiste un insieme di tutti gli insiemi (il cosiddetto insieme universale V), perché la sua esistenza porterebbe alla contraddizione:

$$|\mathcal{P}(V)| > |V| \text{ ma } \mathcal{P}(V) \subseteq V \rightarrow |\mathcal{P}(V)| \leq |V| \text{ contraddizione}$$

Se non esiste un insieme ben fondato di tutti i possibili stati dell'universo, allora non è possibile definire una misura di probabilità su tale insieme. La domanda «quanto è probabile che le leggi fisiche cambino?» è priva di risposta non perché la probabilità sia bassa, ma perché la domanda stessa non è ben posta: non vi è un spazio campionario definibile su cui operare.

Formalmente, supponiamo di voler definire una misura di probabilità P su Ω_{tot} , dove Ω_{tot} è l'insieme di tutti i possibili stati nomologici:

$$P : \mathcal{A}(\Omega_{\text{tot}}) \rightarrow [0, 1] \text{ con } \sum P(\omega) = 1$$

Per la σ -additività di P , dovremmo poter sommare (o integrare) su tutti gli $\omega \in \Omega_{\text{tot}}$. Ma se Ω_{tot} non è un insieme ben definito — se la collezione di tutti i possibili stati nomologici è una *classe propria* piuttosto che un insieme — allora $\mathcal{A}(\Omega_{\text{tot}})$ non è una σ -algebra legittima, e nessuna misura di probabilità è definibile.

La stabilità apparente delle leggi fisiche non costituisce dunque prova della loro necessità, né rende improbabile il loro cambiamento: semplicemente non è possibile calcolare tale probabilità, perché il calcolo presuppone una totalizzazione dello spazio dei possibili che l'ipercaos impedisce strutturalmente.

2.4 La critica al principio leibniziano di ragion sufficiente

A questo punto, l'attacco meillassouxiano al PSR può essere formulato nella sua forma completa. Leibniz aveva sostenuto che il PSR è un assioma del reale: tutto ciò che accade ha una ragione sufficiente. Meillassoux dimostra — o pretende di dimostrare

— che il PSR è indimostrabile non come conseguenza dell'ignoranza umana, ma come conseguenza della struttura stessa del reale. Se ogni fatto è contingente, allora non vi è una ragione *per cui* i fatti siano come sono: essi sono come sono senza ragione, gratuitamente, *ex nihilo* in un senso del termine che non implica creazione ma pura immanenza della contingenza.

Questa conclusione non porta all'irrazionalismo. Meillassoux è attento a distinguere tra la tesi che non vi sia una ragione per cui le cose siano come sono e la tesi che le cose siano incomprensibili. La matematica, in particolare la teoria degli insiemi, rimane un accesso privilegiato alla struttura del reale — non perché la matematica sia necessaria, ma perché essa pensa la struttura della contingenza stessa meglio di qualsiasi altro linguaggio. Questo è il senso del termine *contingenza matematizzabile*: non una contingenza che la matematica elimina, ma una contingenza che la matematica articola nella sua struttura più fine.

2.5 La fattualità come figura dell'assoluto: esposizione e difficoltà interne

Il risultato complessivo dell'argomentazione meillassouxiana può essere formulato come segue: l'unica cosa assoluta — l'unica cosa che non dipende da una correlazione, da una prospettiva, da un punto di vista — è la contingenza stessa. La fattualità non è un difetto epistemico della nostra conoscenza; è il nome dell'assoluto che si può pensare dopo Kant senza ricadere nel dogmatismo precritico.

Questo rappresenta un capovolgimento preciso del programma leibniziano. Leibniz aveva assunto la necessità come orizzonte dell'intelligibilità e la contingenza come limite epistemico di una mente finita. Meillassoux assume la contingenza come struttura dell'assoluto e la necessità come illusione prodotta dal correlazionismo. La necessità, per Leibniz, è ciò verso cui tende l'analisi quando è perfetta; per Meillassoux, è ciò che viene proiettato sul reale da una mente che non sopporta la gratuità del fatto. La posizione di Meillassoux non è priva di difficoltà interne, e la letteratura critica successiva ha individuato almeno tre famiglie di obiezioni che è necessario esporre con precisione prima di procedere.

La *prima obiezione* — sviluppata in modo sistematico da Peter Hallward nel suo contributo «Anything is Possible» (2011) — riguarda il passaggio dalla fatticità alla necessità della contingenza. Meillassoux afferma che la fatticità della correlazione è *pensabile*, e che pensarla come assoluta porta al principio di fatticità. Ma Hallward obietta che questo passaggio contiene uno scivolamento illegittimo: dal fatto che la fatticità della correlazione sia *pensabile* (cioè non contraddittoria per il soggetto che la pensa) non segue che essa costituisca una proprietà *ontologica* dell'essere. Il movimento da «possiamo pensare che la struttura della correlazione avrebbe potuto essere diversa» a «la struttura dell'essere è assolutamente contingente» presuppone esattamente il tipo di accesso diretto alla realtà in sé che il correlazionismo intendeva negare. In altri termini: Meillassoux pretende di uscire dal correlazionismo attraverso una riflessione sulla fatticità della correlazione, ma questa riflessione avviene ancora *all'interno* della struttura correlazionale, e non è ovvio che produca genuina conoscenza dell'assoluto. Il correlazionista coerente potrebbe rispondere: «sì, la fatticità è pensabile, ma questo dice qualcosa sulla struttura del nostro pensiero, non sulla struttura dell'essere». Meillassoux non ha una risposta definitiva a questa obiezione, se non la tesi che il

correlazionismo, per restare coerente, deve riconoscere la propria fatticità — ma questo riconoscimento, appunto, rimane *interno* alla struttura correlazionale.

La *seconda obiezione* — sviluppata da Ray Brassier in *Nil Unbound* (2007) e poi ripresa da diversi commentatori — riguarda il concetto stesso di *possibilità* che l'ipercaos impiega. Quando Meillassoux afferma che le leggi fisiche *avrebbero potuto* essere diverse, o che *potrebbero* cambiare, egli utilizza un operatore modale di possibilità ($\Diamond$) che presuppone un framework modale strutturato. Ma se la contingenza è assoluta e non vi è nulla che costituisca il substrato della possibilità — nessuna struttura nomologica di fondo, nessun spazio logico di alternative — su quale base affermiamo che qualcosa è *possibile*? La nozione meillassouxiana di ipercaos rischia di essere un possibilismo senza possibilità ben definite: una struttura modale priva dei suoi costituenti fondamentali. Si tratta di un paradosso autosabotante: per articolare la tesi della contingenza assoluta occorre far uso di operatori modali ($\Diamond P$, $\Box P$), ma l'uso di questi operatori richiede che vi sia qualcosa come uno spazio delle possibilità strutturato, il che reintroduce esattamente il tipo di struttura nomologica che la tesi dell'ipercaos intende eliminare. Brassier non suggerisce che Meillassoux abbia torto nel rigettare il PSR, ma che la sua alternativa — la contingenza come struttura dell'assoluto — non sia concettualmente più stabile della posizione che intende superare.

La *terza obiezione* — illustrata da Sean Gratton in *Speculative Realism: Problems and Prospects* (2014) — riguarda il ricorso alla teoria degli insiemi come argomento privilegiato. Meillassoux usa il teorema di Cantor sull'inesistenza dell'insieme universale per bloccare il ragionamento probabilistico contro l'ipercaos. Ma la teoria degli insiemi di Zermelo-Fraenkel, a cui si appoggia implicitamente, è essa stessa una costruzione storica, soggetta a revisione e stratificata in assiomatizzazioni diverse (ZF, ZFC, sistemi con assiomi a grandi cardinali). Se la matematica è contingente — come il principio di fatticità sembra implicare, dal momento che nulla è necessario — allora anche l'argomento cantoriano è contingente, e l'intero edificio potrebbe collassare se la matematica fosse strutturata diversamente. Se invece la matematica ha uno statuto privilegiato che la sottrae alla contingenza generale, allora Meillassoux ha implicitamente riconosciuto che vi sono necessità che precedono e fondano la contingenza — esattamente il genere di necessità che il progetto intende escludere. Gratton mostra che questa tensione attraversa l'intera struttura del realismo speculativo e non è risolvibile con distinzioni di livello senza ricorrere a una logica di ordine superiore che Meillassoux non sviluppa.

Va anche notato che Badiou, che ha scritto la prefazione alla prima edizione di *Après la finitude* salutando la proposta come un superamento dell'empirismo trascendentale, non condivide la tesi che la contingenza sia l'ultima parola sull'essere: per Badiou, l'evento è contingente nella sua occorrenza, ma le verità che ne derivano hanno una forma di necessità interna che l'impostazione meillassouxiana non riesce a fondare. La tensione tra Badiou e Meillassoux rivela, su un piano diverso, la stessa struttura di gradiente che questo saggio intende tracciare.

Una quarta difficoltà, che la discussione delle sezioni precedenti permette ora di formulare con precisione, riguarda il rapporto con la necessità kripkiana a posteriori introdotta nel §1.5. La critica meillassouxiana al principio di ragion sufficiente colpisce con efficacia la necessità logica del tipo leibniziano e la necessità nomologica delle leggi fisiche. Ma la necessità essenziale kripkiana — la necessità che l'acqua sia H_2O , che l'identità degli individui sia quella che è — opera a un livello diverso: non è la

necessità delle leggi, ma la necessità dell'identità degli oggetti. Anche se le leggi fisiche fossero contingenti nel senso meillassouxiano, e potessero cambiare da un momento all'altro, ciò non toccherebbe la tesi che *questo* campione di acqua, identificato in questo mondo, sia essenzialmente composto da H₂O. La necessità essenziale kripkiana è insensibile alla contingenza nomologica: un mondo in cui le leggi cambino arbitrariamente può comunque contenere oggetti con proprietà essenziali che non cambiano con le leggi. Per questa ragione, la necessità kripkiana a posteriori costituisce un ostacolo che la strategia di Meillassoux non riesce ad aggirare con i soli strumenti che essa si è data.

Queste quattro difficoltà non invalidano necessariamente il progetto meillassouxiano, ma ne segnano i limiti reali e mostrano dove l'argomentazione richiede ulteriore sviluppo. Il valore del progetto consiste nell'aver mostrato, con rigore, che la necessità del PSR non può essere semplicemente assunta come sfondo del pensiero scientifico e filosofico: essa deve essere giustificata, e la giustificazione è più difficile di quanto Leibniz e la tradizione che lo segue abbiano riconosciuto.

Il Capitolo II del saggio ricostruisce la critica meillassouxiana al principio di ragion sufficiente con rigore considerevole, ma non situa questa critica nel contesto del dibattito analitico sulle leggi di natura che ne costituisce il presupposto implicito. Meillassoux non parla nel vuoto: egli interviene in un dibattito che ha prodotto, tra il 1970 e il 2000, alcune delle analisi filosofiche più precise sul problema della necessità nomologica. Collocare la critica meillassouxiana all'interno di questo dibattito ne chiarisce la portata, ne rivela i limiti, e mostra dove la risposta kripkiano-disposizionale è più efficace.

2.6 La teoria della regolarità humeana e la sua versione lewisiana

La posizione humeana sulle leggi di natura — le leggi come generalizzazioni contingenti sulle regolarità — è stata difesa con strumenti analitici molto più precisi da David Lewis attraverso la Best System Account (BSA). Secondo Lewis, un enunciato è una legge di natura se appartiene al sistema di enunciati che realizza il migliore bilanciamento tra due virtù epistemiche in tensione: la semplicità (il numero di assiomi e la loro forma logica) e la forza informativa (la quantità di informazione che il sistema veicola sui fatti particolari). Le leggi non sono fatti ontologicamente distinti dai fatti particolari; sono le generalizzazioni più utili per descrivere i fatti particolari.

La BSA lewisiana è in accordo con la tesi meillassouxiana che le leggi siano contingenti: se i fatti particolari fossero stati diversi, il migliore sistema che li descrivesse sarebbe diverso, e le leggi sarebbero diverse. Ma la BSA si separa da Meillassoux su un punto cruciale: per Lewis, le leggi non «avrebbero potuto cambiare» nel senso di «questa stessa legge avrebbe potuto smettere di valere»; ciò che è contingente è che vi siano questi fatti particolari, e le leggi sono soltanto il modo più efficiente di descriverli. La contingenza delle leggi in Lewis è derivativa rispetto alla contingenza dei fatti particolari; in Meillassoux, la contingenza delle leggi è primitiva e indipendente dai fatti particolari.

Una difficoltà interna alla BSA — rilevante per il continuum N — è che essa rende le leggi dipendenti dall'intero sistema di fatti, compreso il futuro. Se i fatti futuri sono diversi da come ci aspettiamo, le leggi potrebbero cambiare retroattivamente: un

universo in cui, domani, tutti gli elettroni si comportassero diversamente avrebbe leggi diverse dall'universo attuale, anche se fino a oggi tutto è stato identico. Questa retroattività delle leggi rispetto ai fatti futuri produce una forma di indeterminatezza nomologica che è filosoficamente disturbante e che la BSA non risolve facilmente.

2.7 Il necessitarismo nomologico e la sua risposta a Meillassoux

Il necessitarismo nomologico di Armstrong, già discusso nella Sezione I, offre la risposta più diretta alla critica meillassouxiana. Se le leggi esprimono relazioni necessarie tra universali — $N(F, G)$ — allora la domanda «perché la legge vale?» ha una risposta: perché F e G sono correlati dalla relazione di necessitazione N , che è la struttura dell'universale che li collega. La legge non è contingente in senso assoluto; è necessaria data la struttura degli universali. Meillassoux può rispondere che la relazione $N(F, G)$ è essa stessa contingente — potrebbe non valere in un mondo possibile diverso — ma Armstrong risponde che questo è irrilevante: la necessità nomologica che la legge esprime è quella entro un mondo, non quella tra mondi.

La tensione tra questa posizione e la critica meillassouxiana può essere formalizzata con precisione. Meillassoux afferma:

$\Diamond \neg L(F, G)$ [*la legge L avrebbe potuto non valere*]

Armstrong risponde:

$\Box L(F, G)$ [*L vale con necessità nomologica in ogni mondo compatibile con $N(F, G)$*]

e afferma che $\Diamond \neg L(F, G)$ è vero soltanto se si assume che $N(F, G)$ non valga in quel mondo alternativo — il che equivale a dire che le «proprietà» F e G in quel mondo alternativo sono diverse dalle proprietà F e G nel mondo attuale. La contingenza meillassouxiana delle leggi è compatibile con il necessitarismo nomologico: le leggi sono contingenti tra i mondi, ma necessarie entro ogni mondo dato $N(F, G)$. La critica di Meillassoux al PSR non tocca la necessità nomologica entro un mondo; tocca soltanto la necessità tra mondi.

2.8 La teoria dei migliori sistemi e la posizione di Meillassoux: una mappa

La posizione di Meillassoux rispetto al dibattito sulle leggi di natura può essere collocata in modo preciso. Rispetto alla BSA lewisiana, Meillassoux radicalizza la contingenza: Lewis afferma che le leggi sono contingenti perché i fatti particolari sono contingenti; Meillassoux afferma che le leggi sono contingenti indipendentemente dai fatti particolari, come struttura dell'assoluto. Rispetto al necessitarismo armstrongiano, Meillassoux attacca la necessità della relazione $N(F, G)$: non vi è ragione sufficiente per cui questa relazione valga in questo mondo. Rispetto alla teoria delle disposizioni di Bird, Meillassoux non ha una risposta efficace: se le proprietà fisiche sono essenzialmente disposizionali, la necessità delle leggi è la necessità dell'identità delle proprietà stesse, e questa necessità non dipende da una scelta tra mondi possibili.

Questa mappa rivela che la critica meillassouxiana è più efficace contro le posizioni che separano le leggi dalle proprietà (Armstrong) o che fondano le leggi sui fatti particolari (Lewis) che contro le posizioni che fondano le leggi sull'identità essenziale delle proprietà (Bird, Mumford). La teoria delle disposizioni, combinata con la

necessità kripkiana a posteriori, costituisce la risposta più robusta all'ipercaos: un universo in cui le leggi cambiassero arbitrariamente sarebbe un universo in cui le proprietà fisiche cambiassero la loro identità essenziale, il che è incompatibile con l'esistenza di oggetti identificabili attraverso i mondi possibili.

Capitolo III

La contingenza misurabile: tavole di frequenza, associazione statistica e il paradosso della quantificazione

3.1 Un cambio di registro: quando la contingenza diventa numero

Esiste un senso in cui la parola «contingenza» designa, nella tradizione statistica, qualcosa di radicalmente diverso da ciò che intendono Leibniz e Meillassoux — e tuttavia non del tutto irrelato. In statistica, due variabili sono *contingenti* l'una rispetto all'altra quando la distribuzione di una non è indipendente dalla distribuzione dell'altra: la realizzazione di un certo valore in una variabile modifica la probabilità di certi valori nell'altra. La *tavola di contingenza* è lo strumento grafico e computazionale per organizzare questa relazione in modo da renderla quantificabile.

Il passaggio dalla contingenza metafisica a quella statistica non è soltanto terminologico. Esso rivela qualcosa di strutturalmente significativo: che la stessa parola — contingenza — può designare tanto l'assenza di ragione necessaria quanto la presenza di una dipendenza misurabile. Nella tradizione leibniziana, la contingenza è ciò che *manca* di necessità; nella tradizione statistica, la contingenza (intesa come associazione) è ciò che *ha* una struttura, una direzione, un'intensità. Questo capovolgimento semantico non è accidentale: esso riflette una trasformazione profonda nel modo in cui il pensiero scientifico ha imparato a trattare il particolare, il condizionale, il non-universale.

3.2 La struttura formale della tavola di contingenza

Consideriamo due variabili categoriali X e Y , dove X assume r modalità ($x_1, x_2, \dots, x_r$) e Y assume c modalità ($y_1, y_2, \dots, y_c$). Un campione di n osservazioni può essere classificato in base alle coppie (x_i, y_j) , producendo una tabella con r righe e c colonne: questa è la *tavola di contingenza* $r \times c$.

Denotiamo con:

n_{ij} := numero di osservazioni con $X = x_i$ e $Y = y_j$

$n_{i\bullet}$:= $\sum_j n_{ij}$ (frequenza marginale della riga i)

$n_{\bullet j}$:= $\sum_i n_{ij}$ (frequenza marginale della colonna j)

n := $\sum_i \sum_j n_{ij}$ (dimensione totale del campione)

Le frequenze relative osservate sono:

$f_{ij} = n_{ij} / n$ (frequenza relativa congiunta)

$f_{i\bullet} = n_{i\bullet} / n$ (frequenza relativa marginale di riga)

$f_{\bullet j} = n_{\bullet j} / n$ (frequenza relativa marginale di colonna)

L'ipotesi nulla di *indipendenza statistica* afferma che la distribuzione congiunta fattorizza nel prodotto delle distribuzioni marginali:

$$H_0 : P(X = x_i, Y = y_j) = P(X = x_i) \cdot P(Y = y_j) \quad \forall i, j$$

Ovvero, in termini di frequenze relative attese sotto H_0 :

$$e_{ij} = f_{i\bullet} \cdot f_{\bullet j} \cdot n = (n_{i\bullet} \cdot n_{\bullet j}) / n$$

Le frequenze attese e_{ij} rappresentano ciò che si osserverebbe se le variabili fossero perfettamente indipendenti: esse costituiscono la misura della *contingenza zero* — il punto di riferimento contro cui l'associazione effettiva viene misurata.

3.3 La statistica χ^2 di Pearson: geometria dello scarto

Karl Pearson propose nel 1900 una statistica per misurare lo scarto globale tra le frequenze osservate e quelle attese sotto l'ipotesi di indipendenza. La statistica è definita come:

$$\chi^2 = \sum_i \sum_j (n_{ij} - e_{ij})^2 / e_{ij}$$

Questa espressione ha una geometria precisa. Il termine $(n_{ij} - e_{ij})^2$ misura il quadrato dello scarto tra frequenza osservata e frequenza attesa nella cella (i, j) . La divisione per e_{ij} normalizza lo scarto rispetto alla scala della cella: uno scarto assoluto di 5 unità è molto più rilevante se $e_{ij} = 5$ che se $e_{ij} = 500$. La somma su tutte le $r \cdot c$ celle accumula l'evidenza complessiva contro H_0 .

Sotto H_0 , e nell'approssimazione asintotica ($n \rightarrow \infty$ con $e_{ij} \rightarrow \infty$ per tutte le celle), la statistica χ^2 converge in distribuzione a una variabile casuale chi-quadrato con $(r-1)(c-1)$ gradi di libertà:

$$\chi^2 \rightarrow_d \chi^2_{\{(r-1)(c-1)\}} \text{ sotto } H_0$$

I gradi di libertà si calcolano come $(r-1)(c-1)$ perché, una volta fissati i totali marginali $(r-1)$ frequenze di riga e $(c-1)$ frequenze di colonna sono libere di variare; la cella rimanente è determinata dai vincoli marginali.

Il test rifiuta H_0 a livello α se:

$$\chi^2_{\text{obs}} > \chi^2_{\{(r-1)(c-1), 1-\alpha\}}$$

dove $\chi^2_{\{v, 1-\alpha\}}$ è il quantile $(1-\alpha)$ della distribuzione chi-quadrato con v gradi di libertà.

Vale la pena sottolineare la struttura concettuale di questo test. Esso non misura quanto le variabili siano associate; misura quanto sia *improbabile* osservare i dati osservati (o dati ancora più estremi) se le variabili fossero realmente indipendenti. La significatività statistica non è una misura dell'entità dell'associazione, ma una misura dell'evidenza contro l'ipotesi nulla. Questa distinzione — che nella pratica scientifica viene sistematicamente trascurata — ha conseguenze filosofiche non banali che esamineremo nel seguito.

3.4 La derivazione dell'approssimazione asintotica

La derivazione della distribuzione limite di χ^2 sotto H_0 è istruttiva perché rivela la struttura geometrica sottostante. Partiamo dal caso più semplice di una tavola 2×2 .

Definiamo le variabili standardizzate:

$$Z_{ij} = (n_{ij} - e_{ij}) / \sqrt{e_{ij}}$$

Sotto H_0 , per n grande, ciascun $Z_i \square$ è approssimativamente normale standard. La statistica chi-quadrato diventa:

$$\chi^2 = \sum_i \sum_j Z_{ij}^2$$

che sarebbe la somma di $(r \cdot c)$ quadrati di normali standard, e avrebbe distribuzione $\chi^2_{\{rc\}}$ se le Z_{ij} fossero indipendenti. Ma non lo sono: i vincoli marginali impongono $(r + c - 1)$ vincoli lineari sulle celle, riducendo la dimensione effettiva dello spazio da rc a $rc - (r + c - 1) = (r-1)(c-1)$. Geometricamente, le osservazioni non si muovono liberamente in $\mathbb{R}^{\{rc\}}$ ma su un sottospazio affine di dimensione $(r-1)(c-1)$; la norma al quadrato su questo sottospazio segue una distribuzione χ^2 con $(r-1)(c-1)$ gradi di libertà.

Per la tavola 2×2 con celle $n_{11}, n_{12}, n_{21}, n_{22}$ e totale n , esiste una formula chiusa esatta:

$$\chi^2 = n(n_{11} n_{22} - n_{12} n_{21})^2 / (n_{1\bullet} \cdot n_{2\bullet} \cdot n_{\bullet 1} \cdot n_{\bullet 2})$$

Il numeratore $(n_{11} n_{22} - n_{12} n_{21})^2$ è il quadrato del *determinante* della sotto-matrice 2×2 delle frequenze osservate, scalato per n^3 . Questa formula mostra con immediatezza che $\chi^2 = 0$ se e soltanto se $n_{11} n_{22} = n_{12} n_{21}$, cioè se e soltanto se il rapporto $n_{11}/n_{12} = n_{21}/n_{22}$ — le frequenze relative di Y nelle due categorie di X sono identiche, il che è esattamente la definizione di indipendenza.

3.5 Misure di associazione: φ , V di Cramér, C di Pearson

La statistica χ^2 ha un difetto fondamentale come misura di associazione: il suo valore cresce con n anche se il grado di associazione rimane costante. Se raddoppiamo le frequenze di ogni cella mantenendo le proporzioni, χ^2 raddoppia, ma l'associazione — nel senso intuitivo della parola — non è cambiata. Questo significa che χ^2 misura l'evidenza contro l'indipendenza, non l'intensità dell'associazione.

Per ottenere misure dell'intensità dell'associazione che siano indipendenti dalla dimensione del campione, occorre normalizzare χ^2 . Varie proposte sono state avanzate.

Il coefficiente φ si applica esclusivamente alle tavole 2×2 :

$$\varphi = \sqrt{\chi^2 / n}$$

Il suo valore è compreso tra 0 (indipendenza perfetta) e 1 (associazione perfetta), e può essere negativo se si introduce un segno determinato dal verso dell'associazione. Il quadrato φ^2 coincide con il coefficiente di correlazione di Pearson tra due variabili dicotomiche, il che rivela una connessione profonda tra l'associazione per variabili categoriali e la correlazione per variabili continue.

Il V di Cramér estende φ alle tavole $r \times c$:

$$V = \sqrt{\chi^2 / (n \cdot \min(r-1, c-1))}$$

La normalizzazione per $\min(r-1, c-1)$ — il numero minore tra i gradi di libertà di riga e di colonna — garantisce che $V \in [0, 1]$ indipendentemente dalle dimensioni della tavola. $V = 0$ corrisponde all'indipendenza, $V = 1$ corrisponde alla perfetta associazione.

Il coefficiente di contingenza C di Pearson:

$$C = \sqrt{\chi^2 / (\chi^2 + n)}$$

ha la proprietà di essere invariante rispetto alle permutazioni delle righe e delle colonne, ma il suo valore massimo dipende dalle dimensioni della tavola (in una tavola $r \times r$ con $r \rightarrow \infty$, $C \rightarrow 1$; per $r = 2$, $C_{\max} = 1/\sqrt{2}$), il che ne limita la comparabilità tra tavole di dimensioni diverse.

3.6 Il paradosso filosofico della contingenza misurabile

A questo punto emerge il paradosso filosofico di cui si anticipava l'esistenza. Nella tradizione metafisica, la contingenza è il *correlato dell'assenza di necessità*: un fatto è contingente se non è necessariamente così, se avrebbe potuto essere altrimenti. La contingenza statistica, al contrario, è il *correlato della presenza di dipendenza*: due variabili sono in relazione di contingenza quando il valore dell'una modifica sistematicamente la distribuzione dell'altra. In questo senso, la contingenza statistica è quasi l'*opposto* della contingenza metafisica: essa non designa l'assenza di una struttura ma la presenza di una struttura non banale, non fattorizzabile, non riducibile al prodotto delle parti.

Questa inversione semantica non è un incidente. Essa riflette una trasformazione profonda nel modo in cui il pensiero scientifico ha elaborato la nozione di dipendenza. Nella fisica classica, la dipendenza è espressa mediante relazioni funzionali deterministiche: $y = f(x)$ significa che dato x , il valore di y è *necessariamente* determinato. Nella statistica, la dipendenza è espressa mediante distribuzioni condizionali: $P(Y = y \mid X = x_i) \neq P(Y = y)$ significa che il valore di x *modifica* (ma non determina necessariamente) la distribuzione di Y . La dipendenza statistica è una forma di necessità *probabilistica*: non la necessità che y prenda un valore determinato, ma la necessità che la *distribuzione* di y sia modificata dalla conoscenza di x .

Questa struttura intermedia — tra la necessità assoluta del determinismo leibniziano e la contingenza assoluta dell'ipercaos meillassouxiano — è forse il contributo più originale della statistica al problema della contingenza. Essa suggerisce che la dicotomia necessario/contingente sia inadeguata: la realtà empirica è popolata di strutture che sono al contempo necessarie (non fattorizzabili, riproducibili, generalizzabili) e contingenti (probabilistiche, dipendenti dal contesto, non deduttivamente derivabili da principi primi).

3.6b L'approccio bayesiano: aggiornamento continuo del grado di necessità

Il framework frequentista del test di Pearson tratta la contingenza come proprietà da verificare attraverso un test binario (rigetto o non-rigetto dell'ipotesi nulla). Il framework bayesiano offre una prospettiva fondamentalmente diversa che si allinea più naturalmente con la struttura del continuum N .

In approccio bayesiano, la probabilità a posteriori di H_1 (associazione) rispetto a H_0 (indipendenza) dati i dati D è:

$$P(H_1 \mid D) / P(H_0 \mid D) = [P(D \mid H_1) / P(D \mid H_0)] \times [P(H_1) / P(H_0)]$$

dove il primo fattore a destra è il Bayes factor BF e il secondo sono i rapporti a priori. Il Bayes factor misura *quanto i dati aggiornano la credenza relativa* in H_1 rispetto a H_0 : $BF > 1$ significa che i dati favoriscono H_1 (associazione), $BF < 1$ che favoriscono H_0 (indipendenza). Crucialmente, il Bayes factor è una quantità continua che si aggiorna man mano che si raccolgono nuovi dati — esattamente come $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ aumenta con Γ (profondità dell'analisi). Il framework bayesiano fornisce dunque una realizzazione operativa del parametro Γ del continuum N : ogni nuovo dato corrisponde a un incremento di Γ , e l'aggiornamento bayesiano calcola la corrispondente variazione di N .

Una conseguenza importante è che nel framework bayesiano non vi è mai una conclusione definitiva sull'associazione: la probabilità a posteriori di H_1 si avvicina asintoticamente a 1 man mano che si raccolgono dati consistenti con H_1 , ma non la raggiunge mai in modo assoluto per un numero finito di osservazioni. Questo è il correlato statistico della tesi leibniziana che l'analisi infinita non si esaurisce mai: per un numero finito di passi analitici ($\Gamma < \infty$), la necessità rimane parziale ($N < 1$). Il limite $N = 1$ per $\Gamma \rightarrow \infty$ corrisponde, nel framework bayesiano, al limite $P(H_1 | D_1, D_2, \dots) \rightarrow 1$ per $n \rightarrow \infty$ — il che presuppone, come Leibniz, che il mondo abbia una struttura che un'analisi sufficientemente approfondita potrebbe in linea di principio rivelare completamente.

3.7 Il test di Fisher e la misura esatta della contingenza

Per tavole 2×2 con frequenze marginali fisse e campioni piccoli, il test asintotico di Pearson non è affidabile: le approssimazioni normali non si applicano quando le frequenze attese e_i sono inferiori a 5. In questi casi, Ronald A. Fisher propose nel 1922 un test esatto basato sulla distribuzione ipergeometrica.

Fissati i marginali $n_{1\bullet}, n_{2\bullet}, n_{\bullet 1}, n_{\bullet 2}$, la probabilità esatta di osservare la configurazione $(n_{11}, n_{12}; n_{21}, n_{22})$ sotto H_0 è:

$$P(n_{11}) = C(n_{\bullet 1}, n_{11}) \cdot C(n_{\bullet 2}, n_{12}) / C(n, n_{1\bullet})$$

dove $C(a, b) = a! / (b! (a-b)!)$ è il coefficiente binomiale. Il p-value esatto è la somma delle probabilità di tutte le configurazioni non più probabili di quella osservata:

$$p = \sum_{\{k : P(k) \leq P(n_{11})\}} P(k)$$

Il test di Fisher ha una proprietà notevole: è *condizionale* sui marginali osservati. Questo condizionamento riflette una precisa scelta epistemica: i marginali sono trattati come quantità fisse (o comunque non informative sulla struttura di associazione), e l'inferenza sull'associazione viene condotta esclusivamente sulla base della distribuzione interna della tavola dato quei marginali. Il dibattito su se questo condizionamento sia filosoficamente giustificato — e se i marginali debbano essere trattati come fissi o come variabili casuali — è rimasto aperto per decenni ed ha coinvolto Fisher, Neyman, Pearson (il figlio Egon, non Karl) in una delle controversie metodologiche più feconde della storia della statistica del Novecento.

3.8 Contingenza condizionale e indipendenza parziale: il paradosso di Simpson

Uno degli aspetti più filosoficamente ricchi della contingenza statistica è il cosiddetto paradosso di Simpson, che mostra come la struttura dell'associazione possa invertirsi completamente quando si condiziona su una variabile terza.

Supponiamo che, in un campione aggregato, la variabile X (trattamento medico: sì/no) sia positivamente associata alla variabile Y (guarigione: sì/no): $\chi^2_{\text{obs}} > \chi^2_{\text{crit}}, p < \alpha$. Sembra che il trattamento sia efficace. Supponiamo però che vi sia una terza variabile Z (gravità della malattia: lieve/grave). Quando stratifichiamo il campione per Z , potrebbe accadere che in ogni strato l'associazione si inverta: sia nei pazienti lievi che in quelli gravi, il trattamento è *negativamente* associato alla guarigione. La relazione positiva aggregata era un artefatto della distribuzione disomogenea della gravità tra i gruppi trattati e non trattati.

Formalmente: sia $P(Y = 1 \mid X = 1) > P(Y = 1 \mid X = 0)$ la relazione marginale. È possibile che:

$P(Y = 1 \mid X = 1, Z = z) < P(Y = 1 \mid X = 0, Z = z)$ per ogni $z \in \{\text{lieve, grave}\}$

La condizione necessaria e sufficiente per il paradosso di Simpson in una tavola $2 \times 2 \times 2$ è che Z sia correlata sia con X che con Y : Z è un *confounder* (variabile di confusione). La formula di inversione può essere scritta esplicitamente usando la decomposizione:

$$P(Y \mid X) = \sum_z P(Y \mid X, Z = z) \cdot P(Z = z \mid X)$$

Se $P(Z = z \mid X = 1) \neq P(Z = z \mid X = 0)$, i pesi con cui le probabilità condizionali vengono aggregate differiscono tra i due gruppi, producendo potenzialmente un risultato aggregato di segno opposto a quello dei singoli strati.

Il paradosso di Simpson è filosoficamente rilevante perché mostra che la contingenza statistica — l'associazione tra variabili — non è una relazione binaria tra due variabili ma una relazione *relativa a un contesto di condizionamento*. Non esiste una risposta alla domanda « X e Y sono associate?» indipendente dalla specificazione delle variabili su cui si condiziona. La struttura dell'associazione dipende dall'insieme delle variabili considerate rilevanti — e questa rilevanza è, almeno in parte, una scelta teorica che precede l'analisi dei dati.

Questo relativismo contestuale dell'associazione statistica riecheggia, in modo sorprendente, la tesi leibniziana che la contingenza sia relativa alla postura epistemica dell'osservatore. La contingenza statistica tra X e Y che si osserva nell'aggregato potrebbe rivelarsi necessità statistica (associazione positiva o negativa) in ciascuno strato, o viceversa: l'apparente necessità potrebbe dissolversi in contingenza una volta che si esplori la struttura condizionale più fine. La domanda «questo fatto è contingente o necessario?» non ha risposta assoluta; dipende da quante variabili si includono nell'analisi — esattamente come nella metafisica leibniziana la contingenza dipende da quanti passi dell'analisi si è capaci di compiere.

Esiste una formalizzazione della nozione di contingenza che è distinta sia dalla tradizione statistica sia da quella logico-modale, e che si è sviluppata in modo autonomo nell'ambito della teoria dell'informazione e dell'informatica teorica: la teoria della complessità algoritmica, sviluppata indipendentemente da Kolmogorov (1965), Chaitin (1966) e Solomonoff (1964). Questa teoria offre una misura della «casualità» di una stringa di simboli — e, per estensione, di un fatto o di una configurazione — che ha proprietà filosoficamente rilevanti che la statistica classica non possiede: è definita in modo assoluto (non dipende da un campione o da una distribuzione di riferimento), e il suo limite superiore corrisponde, sorprendentemente, alla struttura della contingenza leibniziana.

3.9 La complessità algoritmica come misura della contingenza

La complessità di Kolmogorov di una stringa x , rispetto a una macchina di Turing universale U , è definita come:

$$K_U(x) = \min \{ |p| : U(p) = x \}$$

dove $|p|$ è la lunghezza del programma p e $U(p)$ è il risultato della computazione di U su input p . In parole: $K_U(x)$ è la lunghezza del programma più corto capace di produrre x . Questa quantità misura la «comprimibilità» di x : una stringa altamente strutturata — come una sequenza di un milione di zeri — ha una complessità molto

bassa (il programma «stampa zero un milione di volte» è molto più corto della stringa), mentre una stringa casuale ha una complessità prossima alla propria lunghezza (non esiste un programma significativamente più corto della stringa stessa che la produca). La connessione con la distinzione leibniziana tra verità necessarie e verità contingenti è diretta e non si riduce a una metafora. Una verità necessaria — una verità logica, un teorema dimostrabile in un numero finito di passi — ha una complessità algoritmica bassa: esiste un programma corto (la dimostrazione) che la genera. Una verità contingente — un fatto la cui ragione richiede, nell'analisi leibniziana, un numero infinito di passi — ha una complessità algoritmica alta: non esiste un programma significativamente più corto del fatto stesso che lo produca. La distinzione leibniziana tra analisi finita (necessità) e analisi infinita (contingenza) corrisponde alla distinzione algoritmico-informazionale tra bassa complessità (struttura, comprimibilità) e alta complessità (casualità, incomprimibilità).

Questa corrispondenza può essere formalizzata attraverso il concetto di stringa casuale nel senso di Martin-Löf (1966): una stringa x di lunghezza n è Martin-Löf casuale se e soltanto se $K(x) \geq n - c$ per una costante c indipendente da x . Una stringa casuale è, in senso preciso, incomprimibile: non può essere generata da alcun programma significativamente più corto di essa stessa. Le stringhe casuali sono «pienamente contingenti» nel senso algoritmico; le stringhe strutturate sono «parzialmente necessarie» nella misura in cui possono essere generate da un programma più corto di esse stesse.

3.10 Il teorema di incomputabilità di Chaitin e il residuo di fatticità

Il risultato più profondo della teoria della complessità algoritmica è il teorema di incomputabilità: la funzione K_U non è calcolabile. Non esiste un algoritmo generale che, data una stringa x , produca il valore esatto di $K_U(x)$. Questo risultato è dimostrato per riduzione al problema della fermata di Turing: se K_U fosse calcolabile, si potrebbe costruire un algoritmo per decidere se un programma p si ferma su un dato input, il che è impossibile per il teorema di Turing.

L'incomputabilità di K ha conseguenze filosofiche di grande portata per il problema della contingenza. Essa afferma che non esiste, nemmeno in linea di principio, un procedimento meccanico per determinare se una stringa data è contingente (alta complessità) o strutturata (bassa complessità). La contingenza è, in questo senso, epistemicamente inaccessibile nella sua misura esatta: possiamo soltanto approssimarla dall'alto (trovando programmi che generano la stringa, ma non sapendo se esiste uno più corto) e mai esaurirla in modo preciso.

Questo risultato riecheggia, in modo sorprendente, la struttura dell'analisi infinita leibniziana. Per Leibniz, la contingenza di un fatto risiede nell'impossibilità di esaurire la sua ragione sufficiente in un numero finito di passi; la ragione c'è, ma è inaccessibile a una mente finita. Per la teoria della complessità algoritmica, la contingenza di una stringa risiede nell'impossibilità di trovare algoritmicamente il suo programma più corto; la struttura potrebbe esserci (il programma minimo esiste come oggetto matematico ben definito), ma è inaccessibile a qualsiasi procedura computazionale. In entrambi i casi, la contingenza non è assenza assoluta di struttura ma inaccessibilità strutturale di una struttura che potrebbe esistere.

La differenza rilevante con Meillassoux è precisamente questa. Meillassoux afferma che le leggi fisiche sono contingenti nel senso che non vi è una ragione per cui siano quelle che sono; l'ipercaos esclude che vi sia un programma sottostante. La teoria della complessità algoritmica apre la possibilità di una posizione intermedia: vi è un programma minimo per ogni stringa (ogni configurazione dell'universo ha una sua complessità algoritmica ben definita), ma quel programma è inconoscibile. La contingenza è epistemica, non ontologica — ma in modo più radicale della versione leibniziana, perché l'inaccessibilità non dipende dalla limitatezza di una mente particolare (che una mente più potente potrebbe superare), ma dall'incomputabilità strutturale, che vale per qualsiasi macchina di Turing.

3.11 Randomness, incomprimibilità e la struttura del gradiente N

La teoria della complessità algoritmica permette di riformulare il gradiente $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ in termini informativi precisi. Definiamo il grado di necessità algoritmica di un fatto E come:

$$N_K(E) = 1 - K(E) / |E|$$

dove $|E|$ è la dimensione della descrizione di E in un linguaggio di riferimento. Questa misura vale 1 quando E è completamente strutturato ($K(E) \approx 0$, il fatto è interamente generato da un programma di lunghezza trascurabile), e vale 0 quando E è completamente casuale ($K(E) \approx |E|$, il fatto non è comprimibile). La dipendenza da Γ corrisponde alla scelta del linguaggio di descrizione e alla profondità della ricerca del programma minimo: un'analisi più approfondita (un Γ più grande) può trovare programmi più corti, aumentando N_K .

In questi termini, il limite leibniziano $N = 1$ corrisponde alla tesi che ogni fatto, per una mente con risorse computazionali illimitate, ha un programma di lunghezza zero — ovvero, ogni fatto è interamente derivabile da una struttura compatta. La posizione meillassouxiana corrisponde alla tesi che $N_K < 1$ per ogni fatto fisico, anche nell'ipotetico limite di risorse computazionali infinite: vi è sempre un residuo di complessità irriducibile. Il teorema di incomputabilità di Chaitin fornisce un risultato che si colloca tra queste due posizioni: non possiamo sapere se $N_K = 1$ o $N_K < 1$ per un fatto dato, perché il calcolo esatto di K è impossibile. La questione leibniziana versus meillassouxiana è, in questa prospettiva, una questione decidibile in linea di principio ma non in pratica — il che le conferisce una struttura formalmente analoga a quella dei problemi indecidibili della logica matematica.

Un ulteriore collegamento con l'Appendice E del saggio riguarda il sesto tipo di necessità — la necessità nomologica della distribuzione quantistica. La regola di Born afferma che la distribuzione delle probabilità dei risultati di misura è determinata dalla struttura della funzione d'onda. In termini di complessità algoritmica, la distribuzione di Born ha una complessità bassa (è generata da una struttura matematica compatta, l'equazione di Schrödinger e la regola di Born stessa), mentre i singoli risultati delle misure hanno complessità alta (sono incomprimibili individualmente). Questa asimmetria — bassa complessità della distribuzione, alta complessità degli eventi individuali — è precisamente la struttura che il saggio descrive come «necessità nomologica della distribuzione della contingenza».

Capitolo IV

Il nastro della vita: contingenza evolutiva, convergenza e la struttura dello spazio morfologico

4.1 La metafora del nastro e la sua portata filosofica

Nel 1989, con *Wonderful Life*, Stephen Jay Gould inaugurò una delle discussioni più feconde e più equivocate della biologia teorica del Novecento. Il libro aveva un pretesto preciso: la reinterpretazione della fauna di Burgess Shale, uno straordinario deposito fossile del Cambriano medio (circa 508 milioni di anni fa), nelle Montagne Rocciose canadesi. Ma il vero oggetto del libro era una tesi sulla struttura della storia evolutiva come processo, tesi che Gould articolò attraverso una metafora presa a prestito dal cinema.

L'immagine è quella del «nastro della vita»: supponiamo di poter riavvolgere il nastro registrato della storia evolutiva fino a un punto qualunque del passato — diciamo al Cambriano, o anche prima — e di ripartire con le stesse condizioni iniziali. Gould sostenne che il risultato sarebbe radicalmente diverso dall'attuale biosfera. Non soltanto non ci sarebbero esseri umani; probabilmente non ci sarebbe nulla di simile a un vertebrato, forse nulla di simile a un animale con sistema nervoso centralizzato, forse neppure nulla di simile alle divisioni tassonomiche di alto livello (phyla) che strutturano la vita attuale. La storia evolutiva, in questa visione, è *contingente* nel senso più pieno: dipende da eventi irripetibili, da estinzioni casuali, da derivate genetiche, da catastrofi astronomiche e geologiche che avrebbero potuto facilmente andare diversamente.

La metafora del nastro non è soltanto un'immagine evocativa: essa articola una precisa posizione teorica sulla struttura dello spazio delle possibilità evolutive. L'evoluzione, per Gould, non ha una direzione intrinseca verso forme più complesse, più intelligenti, più adattate in senso assoluto. Essa è un processo storico contingente, governato da una miscela di selezione naturale, deriva genetica, vincoli di sviluppo e fattori stocastici esterni al genoma e all'organismo. In questo quadro, qualsiasi configurazione presente della biosfera è enormemente improbabile a priori: essa è il risultato di una lunga catena di eventi, ciascuno dei quali avrebbe potuto facilmente non verificarsi o svolgersi diversamente.

4.2 La risposta di Conway Morris: la convergenza evolutiva come argomento

Simon Conway Morris, paleontologo di Cambridge che aveva contribuito alla descrizione originale di molti dei fossili di Burgess Shale, costruì a partire dagli anni Novanta una risposta sistematica alla tesi gouldiana. La risposta è raccolta in modo organico in *Life's Solution* (2003), ma aveva già assunto contorni precisi in articoli precedenti.

L'argomento di Conway Morris è costruito sull'evidenza empirica della *convergenza evolutiva*: il fenomeno per cui linee evolutive indipendenti — separate da decine o

centinaia di milioni di anni di storia separata, senza alcuna ascendenza comune recente — sviluppano strutture, funzioni e talvolta morfologie straordinariamente simili. Gli esempi sono numerosi e ben documentati.

L'occhio a lente si è evoluto indipendentemente almeno sette o otto volte in phyla diversi: nei vertebrati, nei cefalopodi (polpo e calamaro), negli alcioni (crostacei della famiglia Euphausiidae), in alcune meduse cubozoa, in certi molluschi e in specie di vermi policheti. Il fatto che una struttura così complessa — una lente convergente, una retina fotorecetttrice, un sistema di messa a fuoco — si sia originata indipendentemente con tanta frequenza suggerisce che lo spazio morfologico dei sistemi visivi efficienti sia estremamente ristretto: le leggi della fisica ottica e della biochimica delle rodopsine canalizzano fortemente le soluzioni verso un numero limitato di architetture.

Analogamente, il volo si è evoluto indipendentemente nei dinosauri teropodi (e da essi negli uccelli), nei pipistrelli (mammiferi), nelle lucertole volanti del Triassico, nei pterosauri: quattro o più evoluzioni indipendenti della stessa soluzione funzionale. Il veleno iniettato mediante pungiglione o morso è emerso in scorpioni, serpenti, formiche, ragni, vespe, e persino in alcuni mammiferi (come gli ornitorinchi) per vie del tutto indipendenti. La termoregolazione endoterma appare nei mammiferi, negli uccelli e, secondo alcune analisi recenti, in certi pesci pelagici come il tonno rosso.

Conway Morris interpretò questa ricorrenza come evidenza contro la contingenza assoluta: se l'evoluzione fosse davvero un processo radicalmente stocastico, ci aspetteremmo una diversità morfologica molto più ampia — ogni esperimento evolutivo indipendente dovrebbe esplorare una porzione diversa dello spazio delle forme. L'effettiva convergenza verso poche soluzioni privilegiate suggerisce che lo spazio morfologico *non sia uniforme*: esistono picchi di fitness accessibili da molte direzioni e valli che le traiettorie evolutive tendono a evitare, non per caso ma per ragioni strutturali legate alle leggi della fisica, della chimica e della biologia dello sviluppo.

4.3 Formalizzazione: lo spazio morfologico e le sue proprietà

Per valutare il dibattito Gould–Conway Morris in termini rigorosi, è necessario precisare che cosa si intende per *spazio morfologico* e quale struttura esso debba avere perché l'argomento della convergenza abbia la portata che Conway Morris gli attribuisce.

Definiamo lo spazio morfologico M come lo spazio di tutte le forme biologicamente possibili. Ogni punto $m \in M$ rappresenta un fenotipo — o più precisamente, un'intera organizzazione morfologica caratterizzata da un insieme di tratti discreti e continui. La dimensione di M è potenzialmente enorme: anche considerando solo tratti anatomici macroscopici, il numero di combinazioni possibili è astronomico.

Su M definiamo una funzione di fitness $w : M \rightarrow \mathbb{R}^+$ che associa a ogni forma la sua efficienza biologica in un dato ambiente. Il *paesaggio adattativo* (adaptive landscape) di Wright è la coppia (M, w) . L'evoluzione per selezione naturale è, in prima approssimazione, un processo di salita della collinare del paesaggio adattativo: le popolazioni si spostano verso i picchi locali di w .

La tesi gouldiana di contingenza radicale si traduce in una affermazione sulla struttura di (M, w) : il paesaggio adattativo è talmente accidentato e multimodale da rendere la

traiettoria evolutiva fortemente dipendente dalle condizioni iniziali e dai percorsi stocastici seguiti. Formalmente:

Se $m(t)$ è la traiettoria evolutiva di una popolazione nel tempo t , allora

$m(t)$ è altamente sensibile a $m(0)$ e alle fluttuazioni stocastiche $\xi(t)$:

$$\partial m / \partial t = \nabla_m w(m) + \xi(t)$$

dove $\xi(t)$ è un processo stocastico (rumore bianco, drift genetico, eventi catastrofici)

La varianza di $m(T)$ per T grande è: $\text{Var}[m(T)] \gg 0$ anche per ξ piccolo

In un paesaggio gouldiano, la divergenza tra traiettorie che partono da punti vicini cresce rapidamente, come in un sistema caotico deterministico o stocastico. L'analogia con la sensibilità alle condizioni iniziali nei sistemi dinamici caotici è esplicita: l'esponente di Lyapunov positivo del processo evolutivo renderebbe impossibile prevedere l'esito finale, e rieseguire l'esperimento dall'inizio produrrebbe risultati radicalmente diversi.

La tesi di Conway Morris si traduce invece in una affermazione sulla struttura topologica del paesaggio: esistono regioni di M — i cosiddetti *attractor basins* o bacini di convergenza — che hanno un'ampiezza molto grande rispetto al totale. Molte traiettorie evolutive indipendenti vengono attratte verso gli stessi picchi, non perché partano dallo stesso punto, ma perché i picchi sono larghi, profondi e accessibili da molte direzioni.

Formalmente, sia $A(m^*)$ il bacino di attrazione del picco m^* :

$$A(m^*) = \{m \in M : m(t) \rightarrow m^* \text{ per } t \rightarrow \infty, \text{ dati } m(0) = m\}$$

La tesi di Conway Morris afferma che per certi picchi privilegiati (l'occhio a lente, il volo, la termoregolazione), $\mu(A(m^*)) / \mu(M)$ è significativamente maggiore di quanto ci si aspetterebbe da un paesaggio uniforme, dove μ è una misura naturale su M . La convergenza evolutiva è il correlato empirico dell'ampiezza dei bacini di attrazione.

4.4 Il problema della definizione di «contingenza» nel dibattito biologico

Un'analisi attenta della controversia Gould–Conway Morris rivela che le due parti non stanno semplicemente argomentando su dati empirici: esse adoperano concetti di contingenza strutturalmente diversi, e questa eterogeneità concettuale contribuisce a rendere il dibattito più difficile da risolvere di quanto i protagonisti stessi riconoscessero.

Gould usa «contingenza» in almeno tre sensi distinti che è necessario tenere separati.

Il primo è la *contingenza stocastica pura*: l'evoluzione è influenzata da eventi fisici e astronomici (impatti di meteoriti, glaciazioni, variazioni dell'orbita terrestre) che non hanno alcuna struttura biologicamente rilevante e che sono, per ogni scopo pratico, imprevedibili. La grande estinzione del Cretaceo–Paleogene, causata dall'impatto di Chicxulub 66 milioni di anni fa, è l'esempio paradigmatico: essa ha eliminato i dinosauri non aviari e aperto nicchie ecologiche che i mammiferi hanno poi occupato. Se quell'impatto non si fosse verificato — se il bolide avesse mancato la Terra di qualche centinaio di migliaia di chilometri — i dinosauri avrebbero probabilmente continuato a dominare le nicchie terrestri di grande taglia, e l'evoluzione dei mammiferi avrebbe seguito una traiettoria radicalmente diversa.

Il secondo senso è la *contingenza di percorso*: dati i vincoli della storia evolutiva pregressa, le strutture che si evolvono in un clade sono fortemente condizionate dall'anatomia

degli antenati. I vertebrati hanno quattro arti perché i loro antenati ittici avevano quattro pinne pari; questa storicità anatomica vincola lo spazio delle forme accessibili e produce quella che Stuart Kauffman chiamava *path dependence*. Le soluzioni evolutionary disponibili non sono le stesse per tutti i cladi: lo stesso problema adattativo viene risolto con strumenti diversi a seconda del punto di partenza morfologico.

Il terzo senso, il più radicale, è la *contingenza del risultato finale*: anche se si ripetesse l'esperimento con le stesse condizioni iniziali e gli stessi eventi fisici, il risultato non sarebbe lo stesso a causa della natura intrinsecamente stocastica dei processi evolutivi a scala molecolare (mutazione, ricombinazione, deriva genetica in popolazioni piccole). Conway Morris risponde principalmente al primo e al secondo senso, concedendo che eventi catastrofici e contingenze storiche influenzino *quali* organismi si trovano in *quale* nicchia, ma sostenendo che le *forme* che queste nicchie selezionano sono in larga misura prevedibili: le leggi fisiche e chimiche rendono un piccolo numero di architetture biologiche molto più efficienti delle alternative, e l'evoluzione le trova indipendentemente dalle contingenze storiche. In altri termini, Conway Morris distingue tra la contingenza del *chi* (quale clade occupa quale nicchia) e la contingenza del *cosa* (quale forma biologica emerge da quella nicchia): il primo è contingente, il secondo tende verso la convergenza.

4.4b Il problema della circolarità nel paesaggio adattativo: la dinamica Red Queen

La formalizzazione del paesaggio adattativo di Wright come struttura fissa presuppone che la funzione di fitness $w(m)$ sia stazionaria. Ma in un ecosistema reale, la fitness di un organismo dipende dagli altri organismi con cui co-evolve, e questo produce una *Red Queen dynamics* in cui il paesaggio si trasforma mentre gli agenti lo scalano.

Formalmente, in un sistema co-evolutivo a due specie:

$$dx/dt = \nabla_x w_x(x, y) + \xi_x(t) \quad dy/dt = \nabla_y w_y(x, y) + \xi_y(t)$$

dove x e y sono i vettori di strategia delle due specie e w_x, w_y dipendono entrambe da entrambi i vettori. La dinamica di questo sistema può produrre cicli co-evolutivi — oscillazioni perpetue in cui ciascuna specie insegue l'altra in un ciclo senza fine (come i co-evolventi di predatore-preda nel modello di Lotka-Volterra) — o anche dinamica caotica, in cui piccole perturbazioni producono traiettorie radicalmente diverse.

La Red Queen dynamics amplifica la contingenza rispetto al paesaggio adattativo statico: le traiettorie evolutive dipendono non soltanto dalle condizioni iniziali di ciascuna specie, ma dall'intera traiettoria co-evolutiva dell'ecosistema. Questo introduce una forma di path-dependence all'*ecosistema* (non solo al clade), rendendo ancora più difficile predire l'esito dell'evoluzione. D'altro canto, la Red Queen dynamics può produrre strutture quasi-periodiche stazionarie — cicli di co-evoluzione che si mantengono stabili per milioni di anni — che introducono una quasi-necessità *dinamica*: non la necessità di raggiungere un punto fisso, ma la necessità di oscillare entro corridoi definiti della dinamica. Questa è un'ottava forma di necessità, complementare alle sei identificate nell'Appendice E.

4.5 La struttura matematica della convergenza: attrazione e misura

Per valutare in modo quantitativo quanto sia significativa la convergenza evolutiva come evidenza contro la contingenza, è necessario costruire un test statistico appropriato. La difficoltà principale è che la convergenza evolutiva non è un fenomeno semplice da quantificare: due strutture possono essere simili per ragioni omologiche (discendenza comune) o analogiche (convergenza vera); separare le due cause richiede un'analisi filogenetica rigorosa.

Il metodo standard per identificare la convergenza autentica è l'analisi filogenetica comparata. Dato un albero filogenetico τ con n foglie (specie viventi) e valori di un tratto morfologico $x_1, x_2, \dots, x_n$, si vuole testare se la varianza della trasformazione evolutiva del tratto è inferiore a quella attesa sotto un modello neutro di *Brownian motion* (moto browniano evolutivo, corrispondente alla deriva genetica pura).

Sotto il modello Browniano, il tratto si evolve secondo:

$$dx = \sigma dW_t$$

dove σ^2 è la varianza evolutiva per unità di tempo e W_t è un moto browniano standard. In questo modello, la covarianza tra i valori del tratto in due specie i, j è:

$$\text{Cov}(x_i, x_j) = \sigma^2 \cdot t_{ij}$$

dove t_{ij} è la lunghezza del ramo condiviso nell'albero filogenetico (il tempo dall'antenato comune più recente). La matrice di varianza-covarianza tra le specie è dunque:

$$\Sigma = \sigma^2 \cdot C$$

dove C è la matrice di covarianza filogenetica (matrice delle lunghezze dei rami condivisi). Sotto il modello neutro, il vettore dei valori del tratto $x = (x_1, \dots, x_n)$ segue una distribuzione normale multivariata:

$$x \sim N(\mu \cdot \mathbf{1}, \sigma^2 \cdot C)$$

La convergenza si manifesta come una varianza residuale *inferiore* a quella predetta da $\sigma^2 \cdot C$: certi piani dello spazio morfologico sono più densamente popolati di quanto il moto browniano preveda. Un test formale può essere costruito confrontando il log-likelihood del modello Browniano con quello di modelli alternativi che includono attrazione verso un optima (come il modello di Ornstein-Uhlenbeck):

$$dx = \alpha(\theta - x) dt + \sigma dW_t$$

dove θ è il valore ottimale verso cui il tratto è attratto e α è la forza di attrazione. Il modello di Ornstein-Uhlenbeck produce una distribuzione stazionaria:

$$x \sim N(\theta, \sigma^2/(2\alpha)) \text{ per } t \rightarrow \infty$$

con varianza $\sigma^2/(2\alpha) < \sigma^2 t$ per t abbastanza grande. Il confronto tra i modelli mediante criterio AIC (Akaike Information Criterion) o test del rapporto di verosimiglianza consente di quantificare l'evidenza empirica a favore dell'attrazione verso un optima rispetto alla deriva pura.

4.6 La posizione di Gould sul Burgess Shale: una rivalutazione

Va sottolineato che la lettura gouldiana dei fossili di Burgess Shale è stata significativamente ridimensionata dagli studi filogenetici successivi. Gould aveva sostenuto che la fauna cambriana presentasse una *disparity* morfologica molto superiore a quella attuale — una varietà di piani corporei (body plans) senza

precedenti nella storia della vita — e che la successiva riduzione di questa diversità fosse il risultato di estinzioni casuali piuttosto che di selezione sistematica.

Ricerche di Derek Briggs, Simon Conway Morris stesso e successivamente di vari gruppi di paleontologi quantitativi hanno ridimensionato questa tesi. L'analisi cladistica rigorosa dei fossili di Burgess Shale ha mostrato che molti degli animali che Gould descriveva come rappresentanti di piani corporei radicalmente nuovi erano in realtà membri di phyla già noti, con morfologie più strane di quelle moderne ma non più diverse in senso fondamentale. La disparity del Cambriano non era così eccezionale come Gould sosteneva; la sua tesi riposava parzialmente su un'interpretazione errata delle affinità filogenetiche di certi taxa.

Questo non invalida la tesi di fondo sulla contingenza evolutiva, ma la indebolisce empiricamente: se la diversità del Cambriano era minore di quanto Gould credesse, l'argomento che essa fosse stata drasticamente ridotta da estinzioni casuali perde forza. Le estinzioni di massa rimangono eventi di grande rilievo evolutivo, ma il loro carattere puramente casuale — senza struttura biologica — è stato messo in discussione: c'è evidenza che certe caratteristiche biologiche (corpo di grande taglia, tasso metabolico elevato, distribuzione geografica ristretta) aumentino sistematicamente la vulnerabilità alle estinzioni, il che introduce una componente selettiva anche nelle crisi biologiche.

4.7 Sintesi: un continuum tra contingenza e necessità

Il dibattito Gould–Conway Morris non si risolve in una vittoria di uno dei due contendenti. Esso rivela, invece, che la contingenza evolutiva ha una struttura *stratificata* analoga a quella che abbiamo trovato nella metafisica leibniziana e nella statistica.

A scala temporale breve e a livello molecolare, i processi evolutivi sono dominati da stocasticità: la deriva genetica, la mutazione casuale, la ricombinazione sono fonti di variabilità che rendono l'evoluzione a questo livello genuinamente contingente nel senso di Gould. A scala temporale lunga e a livello morfologico macroscopico, le leggi fisiche e chimiche canalizzano fortemente lo spazio delle soluzioni accessibili, e la convergenza documentata da Conway Morris rivela una struttura di vincoli che introduce qualcosa di analogo alla necessità: non la necessità logica di Leibniz, ma la necessità dei vincoli fisici su uno spazio di possibilità.

Questa doppia struttura — stocasticità locale, convergenza globale — può essere formalizzata come un sistema dinamico con due scale temporali:

A scala breve τ : $dm = \nabla_m w(m) dt + \sigma(m) dW_t$

(stocastico, path-dependent, contingente)

A scala lunga $T \gg \tau$: $m(T) \rightarrow m^*$ in probabilità per bacini ampi

(convergente, attraente, quasi-necessario)

La contingenza e la necessità non sono qui alternative binarie ma regimi diversi dello stesso processo osservato a scale temporali diverse. La domanda «l'evoluzione è contingente o necessaria?» è, in questo senso, una domanda mal posta: essa presuppone che contingenza e necessità siano proprietà intrinseche del processo piuttosto che proprietà relazionali che emergono dall'interazione tra la struttura del processo e la scala di osservazione.

Questa conclusione riecheggia, sorprendentemente, sia la tesi leibniziana (la contingenza è relativa alla profondità dell'analisi) che la critica meillassouxiana (non vi è una frontiera netta tra il contingente e il necessario). Il dibattito biologico, apparentemente distante dalla speculazione filosofica, converge verso la stessa tensione di fondo — e la sua irrisolvibilità empirica riflette forse non tanto una carenza di dati quanto una profonda indeterminatezza della domanda stessa.

Il dibattito Gould–Conway Morris trattato nel Capitolo IV analizza la convergenza evolutiva a livello morfologico macroscopico. Esso tuttavia omette un livello di analisi intermedio — quello dello sviluppo embrionale — che è indispensabile per comprendere il meccanismo attraverso cui i vincoli fisici e chimici si traducono in vincoli sulle forme biologiche. L'*evolutionary developmental biology*, nota come *evo-devo*, studia precisamente questo livello: l'architettura dei processi che trasformano un uovo fertilizzato in un organismo adulto, e i modi in cui questa architettura vincola e canalizza lo spazio delle forme evolutivamente accessibili.

4.8 L'architettura della canalizzazione di sviluppo

Il concetto di canalizzazione fu introdotto da Conrad Waddington negli anni Quaranta del Novecento attraverso la metafora del paesaggio epigenetico: un sistema di «valli» e «creste» nel quale una biglia (l'organismo in sviluppo) tende a discendere verso le valli anche quando perturbata lateralmente. Le valli rappresentano i percorsi di sviluppo canali (*chreodi*), e la canalizzazione è la tendenza dei processi di sviluppo a mantenersi su questi percorsi nonostante variazioni genetiche e ambientali.

La formalizzazione moderna della canalizzazione di sviluppo si basa su reti di regolazione genetica (*gene regulatory networks*, GRN). Una GRN è un grafo orientato $G = (V, E)$ in cui i nodi V rappresentano geni e gli archi E rappresentano relazioni di regolazione (attivazione o inibizione). Lo stato del sistema al tempo t è un vettore binario o continuo $s(t) \in \{0, 1\}^{|V|}$, dove $s_i(t) = 1$ se il gene i è attivo e 0 altrimenti. La dinamica del sistema è governata da funzioni di aggiornamento:

$$s_i(t+1) = f_i(s_{j1}(t), s_{j2}(t), \dots) \text{ per ogni } i$$

dove $j1, j2, \dots$ sono i geni che regolano i . Le GRN hanno tipicamente attrattori — stati o cicli verso cui la dinamica converge da un'ampia varietà di condizioni iniziali. Questi attrattori corrispondono ai tipi cellulari differenziati (neurone, cellula muscolare, cellula epatica) che emergono dallo sviluppo: l'identità cellulare è un attrattore della dinamica della rete di regolazione genica.

Questa struttura formale ha conseguenze dirette per il problema della contingenza. I tipi cellulari — e, per estensione, i piani corporei fondamentali — non sono determinati dall'ambiente esterno ma dall'architettura della GRN. Ma i bacini di attrazione della GRN non sono uniformi: certi attrattori hanno bacini molto ampi (sono raggiunti da molte condizioni iniziali diverse), mentre altri hanno bacini ristretti (sono raggiunti soltanto da condizioni iniziali molto specifiche). Le strutture biologiche che corrispondono ad attrattori con bacini ampi sono evolutivamente stabili — e tendono a convergere — mentre le strutture che corrispondono ad attrattori con bacini ristretti sono evolutivamente fragili e tendono a divergere.

4.9 I geni toolkit e la struttura delle necessità di sviluppo

Uno dei risultati più sorprendenti dell'evo-devo è la scoperta che i meccanismi molecolari di controllo dello sviluppo sono conservati in modo straordinariamente ampio attraverso l'intero albero della vita animale. I geni Hox — una famiglia di geni regolatori che controllano lo sviluppo dell'asse antero-posteriore — sono condivisi tra insetti, crostacei, vermi e vertebrati, con una organizzazione cromosomica e una funzione colineare (i geni si esprimono nella stessa sequenza lungo il cromosoma e lungo l'asse del corpo) che è rimasta invariata per oltre 550 milioni di anni di evoluzione separata. Analogamente, i geni Pax6 controllano lo sviluppo degli occhi in organismi con strutture visive radicalmente diverse — l'occhio composto delle drosophile e l'occhio a lente dei vertebrati — nonostante le due strutture si siano evolute indipendentemente.

Questa conservazione profonda dei meccanismi di sviluppo non è un'anomalia evolutiva ma una necessità funzionale: i geni toolkit controllano processi di sviluppo fondamentali (l'asse antero-posteriore, la differenziazione tra dorsale e ventrale, la formazione degli appendici) che sono vincoli invarianti per qualsiasi organismo bilateralmente simmetrico sufficientemente complesso. Modificare radicalmente questi meccanismi è, nella maggior parte dei casi, letale: gli organismi che sopravvivono con mutazioni in questi geni sono rari e soltanto quando la mutazione non altera la funzione fondamentale del gene.

In termini del continuum N, questo risultato afferma che certi aspetti dello sviluppo biologico hanno N prossimo a 1 su scale evolutive molto ampie (Γ corrispondente a centinaia di milioni di anni di evoluzione): essi non cambiano nonostante l'enorme variazione genetica che si accumula in tutti gli altri aspetti del genoma. Questa quasi-necessità evolutiva è una forma di necessità kripkiana a posteriori: i geni Hox sono «necessari a posteriori» per qualsiasi organismo bilaterale, perché la loro funzione è essenziale per il tipo di sviluppo che definisce questa categoria di organismi. Non vi è un mondo possibile in cui gli animali bilaterali esistano nella loro forma attuale senza i geni Hox o loro equivalenti funzionali.

4.10 Evo-devo e la revisione del dibattito Gould–Conway Morris

L'evo-devo fornisce un'analisi meccanicistica del dibattito Gould–Conway Morris che entrambi i contendenti non avevano a disposizione nella sua forma matura. Gould sosteneva che la diversità dei piani corporei del Cambriano suggerisce una contingenza radicale: se l'esperimento evolutivo fosse ripetuto, i piani corporei emergenti sarebbero diversi. Conway Morris sosteneva che i vincoli fisici e chimici canalizzano l'evoluzione verso un numero ristretto di soluzioni. L'evo-devo mostra che entrambi hanno ragione, ma a livelli diversi di descrizione.

A livello molecolare e dei meccanismi di sviluppo di base, Conway Morris ha ragione: i geni toolkit sono conservati perché sono necessari per qualsiasi sviluppo complesso. A livello morfologico macroscopico — quali strutture specifiche emergono da questi meccanismi di base — Gould ha parzialmente ragione: la contingenza stocastica (mutazioni, selezione, deriva genetica) determina quale delle molteplici soluzioni morfologiche compatibili con i vincoli di sviluppo viene realizzata. L'evo-devo

introduce così una gerarchia di livelli al problema della contingenza: necessità di sviluppo al livello molecolare, quasi-necessità funzionale al livello della morfologia macroscopica efficiente, contingenza stocastica al livello della realizzazione specifica. Questa gerarchia si integra naturalmente con il continuum N : $N = N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ assume valori diversi a Σ = livello molecolare (alto, quasi-necessità dei geni toolkit), a Σ = livello morfologico (intermedio, dipende dall'ampiezza del bacino di attrazione nel paesaggio adattativo), e a Σ = livello filogenetico specifico (basso, dipendente dalla storia contingente del clade). L'evo-devo non risolve il dibattito ma lo stratifica: la domanda «l'evoluzione è contingente o necessaria?» diventa «a quale Σ ?», e la risposta varia sistematicamente con la scala.

Capitolo V

La distinzione come gradiente: verso una teoria unificata della contingenza

5.1 Il filo comune: contingenza come relazione, non come proprietà

I tre domini attraversati nei capitoli precedenti — la metafisica leibniziana, la speculazione meillassouxiana, la statistica e la biologia evoluzionistica — convergono verso una medesima difficoltà strutturale. In ciascuno di essi, la distinzione tra contingente e necessario non si presenta come una bipartizione netta tra due classi di entità o di eventi separabili l'una dall'altra da un criterio univoco; si presenta piuttosto come una tensione interna, come un gradiente che attraversa gli oggetti dell'analisi e che varia con il mutare della postura epistemica dell'osservatore.

Nella metafisica leibniziana, la distinzione è esplicita: le verità di ragione sono necessarie (la loro negazione è contraddittoria), le verità di fatto sono contingenti (la loro ragione richiede un'analisi infinita). Ma abbiamo visto che questa distinzione presuppone una differenza tra analisi finita e analisi infinita che è, a sua volta, relativa alla complessità dell'oggetto e alla capacità analitica del soggetto. Una mente diversamente costituita — con una diversa architettura cognitiva — potrebbe tracciare la linea di demarcazione in un punto differente. E poiché Leibniz stesso ammette che la necessità morale è una forma di necessità che non è assoluta ma è comunque stringente, la distinzione si rivela come un continuum con due estremi ideali: la necessità logica assoluta (vera contraddizione nella negazione) e la contingenza pura (assenza totale di ragione sufficiente), con una zona intermedia di necessità relativa e contingenza vincolata che occupa la maggior parte dello spazio degli enunciati reali.

Nella critica meillassouxiana, la distinzione è capovolta ma non eliminata: la contingenza diventa l'unica vera necessità, mentre la necessità apparente delle leggi fisiche è smascherata come proiezione correlativistico. Ma abbiamo notato che questo capovolgimento lascia in piedi la tensione, spostata di un livello: la necessità della contingenza è essa stessa una forma di necessità modale, e l'ipercaos, per essere pensabile, richiede almeno la stabilità della logica elementare — almeno per il tempo

sufficiente a formulare la tesi che nulla è necessario. La posizione di Meillassoux è dunque meno radicale di quanto proclami: essa non elimina la distinzione ma la meta-stabilizza al livello del principio di fatticità.

Nella statistica, la distinzione si trasforma nella differenza tra indipendenza e dipendenza, tra l'ipotesi nulla e la sua falsificazione. Abbiamo visto che questa differenza non è binaria ma graduata: il V di Cramér misura l'intensità dell'associazione su un continuum tra 0 e 1. Il paradosso di Simpson ha mostrato che l'associazione — e dunque la dipendenza, e dunque la forma statistica della necessità — è relativa al contesto di condizionamento: ciò che appare necessario nell'aggregato si rivela contingente nello strato, e viceversa.

Nella biologia evolutiva, la tensione tra la contingenza stocastica locale e la convergenza globale ha rivelato una struttura a doppia scala: stocasticità e path-dependence dominano il breve periodo, mentre i vincoli fisici e chimici producono convergenza nel lungo periodo. La distinzione tra contingente e necessario si è rivelata sensibile alla scala temporale di osservazione.

La tesi che questo capitolo intende sviluppare è che queste quattro istanze non siano casi separati di un unico problema, ma manifestazioni di un medesimo fenomeno strutturale: la distinzione tra necessario e contingente è una distinzione di grado lungo un continuum definito da tre parametri — la profondità dell'analisi disponibile, la scala di osservazione, e la ricchezza del contesto di condizionamento. Variare uno qualunque di questi parametri trasforma ciò che appare contingente in necessario, o viceversa.

5.2 Il continuum formale: una proposta

Sia E un evento, una legge, una configurazione morfologica o un'associazione statistica — qualsiasi entità per la quale abbia senso chiedersi se sia contingente o necessaria. Proponiamo di misurare il *grado di necessità* $N(E)$ di E mediante una funzione:

$$N : E \times \Gamma \times \Sigma \times \Delta \rightarrow [0, 1]$$

dove:

Γ := profondità dell'analisi (numero di passi analitici, livelli di spiegazione)

Σ := scala di osservazione (temporale, spaziale, nomologica)

Δ := contesto di condizionamento (insieme delle variabili tenute fisse)

con le seguenti proprietà strutturali:

(i) $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ è non-decrescente in Γ :

più profonda è l'analisi, più necessario appare E

(ii) $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ dipende non-monotonicamente da Σ :

vi sono scale a cui E appare contingente e scale a cui appare necessario

(iii) $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ è non-decrescente nella ricchezza di Δ :

condizionare su più variabili può aumentare o diminuire la necessità apparente

(il paradosso di Simpson mostra che l'effetto può invertirsi)

(iv) $\lim_{\Gamma \rightarrow \infty} N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta) = 1$ per ogni E con ragione sufficiente (Leibniz)

$\lim_{\Gamma \rightarrow \infty} N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta) < 1$ per ogni E nel quadro meillassouxiano

La condizione (iv) cattura esattamente il nodo del disaccordo tra Leibniz e Meillassoux: il primo afferma che un'analisi infinitamente approfondita rivelerebbe la necessità di ogni fatto; il secondo nega che questa convergenza abbia luogo — il limite

superiore dell'analisi non è 1 ma un valore strettamente inferiore, corrispondente all'irriducibile residuo di fatticità.

Il punto epistemologicamente decisivo è che per nessun evento reale siamo in grado di collocarci agli estremi ideali. Né $\Gamma = 0$ (ignoranza totale) né $\Gamma = \infty$ (analisi completa) sono posizioni accessibili: ogni osservatore reale si trova in una posizione intermedia, e il valore di $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ che egli misura dipende in modo essenziale dalla sua collocazione lungo l'asse di profondità analitica.

5.3 L'indipendenza condizionale come ponte tra i domini

Una struttura matematica che attraversa tutti e tre i domini non metafisici — la statistica, la biologia, e in modo implicito anche la fisica — è quella dell'*indipendenza condizionale*. Essa merita un'analisi autonoma per la sua capacità di illuminare la natura relazionale della distinzione tra contingente e necessario.

Due eventi A e B si dicono condizionalmente indipendenti dato un terzo evento C se:

$$P(A \cap B \mid C) = P(A \mid C) \cdot P(B \mid C)$$

equivalentemente:

$$P(A \mid B, C) = P(A \mid C)$$

Ciò significa che, una volta fissato C, la conoscenza di B non aggiunge informazione su A. In termini di entropia condizionale (entropia di Shannon):

$$H(A \mid B, C) = H(A \mid C) \Leftrightarrow A \perp\!\!\!\perp B \mid C$$

dove $H(X \mid Y) = -\sum_{\{x,y\}} P(x,y) \log P(x|y)$ è l'entropia condizionale.

La misura dell'informazione mutua condizionale è:

$$I(A; B \mid C) = H(A \mid C) - H(A \mid B, C) = \sum_{\{a,b,c\}} P(a,b,c) \log [P(a,b|c) / (P(a|c) P(b|c))]$$

Quando $I(A; B \mid C) = 0$, A e B sono condizionalmente indipendenti dato C; quando $I(A; B \mid C) > 0$, vi è dipendenza residua. La necessità statistica di A dato B è massima quando $I(A; B \mid C) = H(A \mid C)$, ovvero quando B determina completamente A condizionatamente a C.

Questa struttura dell'informazione mutua condizionale permette di riformulare la distinzione leibniziana tra verità necessarie e contingenti in termini informativi. Una verità necessaria è tale per cui:

$$I(\text{Conclusione}; \text{Premesse} \mid \text{Contesto}) = H(\text{Conclusione} \mid \text{Contesto})$$

cioè le premesse determinano completamente la conclusione, esaurendone l'incertezza. Una verità contingente è tale per cui:

$$I(\text{Fatto}; \text{Contesto}) < H(\text{Fatto})$$

cioè il contesto riduce l'incertezza sul fatto ma non la elimina: rimane un residuo di incertezza irriducibile — esattamente il residuo che nella terminologia leibniziana corrisponde all'impossibilità di completare l'analisi infinita, e nella terminologia meillassouxiana corrisponde alla fatticità irriducibile dell'essere.

5.4 La termodinamica come caso limite: necessità emergente dal caos

Un ambito in cui la tensione tra contingenza e necessità assume una forma particolarmente illuminante è quello della meccanica statistica e della termodinamica. Qui il passaggio dal microscopico contingente al macroscopico necessario è non

soltanto osservabile ma formalmente derivabile, e costituisce uno dei risultati più profondi della fisica del Novecento.

A scala microscopica, il moto di ogni molecola in un gas è governato da equazioni hamiltoniane deterministiche ma, per una quantità macroscopica di molecole ($N \sim 10^{23}$), la sensibilità alle condizioni iniziali è talmente estrema che il comportamento microscopico è, per ogni scopo pratico, contingente: è impossibile, in linea di principio, specificare le condizioni iniziali con precisione sufficiente a predire le traiettorie individuali su scale temporali rilevanti.

Eppure, a scala macroscopica, emergono *leggi necessarie*: la legge dei gas perfetti, il secondo principio della termodinamica, le equazioni di Navier-Stokes. Questi risultati macroscopici non dipendono dai dettagli microscopici contingenti; essi emergono dall'*aggregazione* di un numero enorme di gradi di libertà contingenti. La derivazione formale di questa emergenza è il programma della meccanica statistica.

Il risultato fondamentale è il teorema di Boltzmann–Gibbs. Definiamo lo spazio delle fasi microscopico $\Omega = \{(q_1, p_1, \dots, q_N, p_N)\} \subset \mathbb{R}^{6N}$ di un sistema di N particelle con posizioni q_i e momenti p_i . Una distribuzione di probabilità su Ω è una misura μ tale che:

$$\int_{\Omega} d\mu(q,p) = 1$$

L'entropia di Boltzmann di questa distribuzione è:

$$S[\mu] = -k_B \int_{\Omega} \mu(q,p) \ln \mu(q,p) dq dp$$

Il principio del massimo dell'entropia (MaxEnt) di Jaynes afferma che la distribuzione di equilibrio è quella che massimizza $S[\mu]$ soggetta ai vincoli macroscopici imposti (energia media fissa, volume fisso, etc.):

$$\mu^* = \operatorname{argmax}_{\{\mu\}} S[\mu] \text{ soggetto a } \langle E \rangle = U \text{ (energia interna)}$$

La soluzione a questo problema variazionale è la distribuzione canonica di Gibbs:

$$\mu^*(q,p) = \exp(-\beta H(q,p)) / Z(\beta)$$

dove H è l'hamiltoniana del sistema, $\beta = 1/(k_B T)$ è l'inverso della temperatura, e $Z(\beta) = \int \exp(-\beta H) dq dp$ è la funzione di partizione.

La struttura di questo risultato è filosoficamente rilevante. Le proprietà macroscopiche termodinamiche (temperatura, pressione, entropia) sono *necessariamente* determinate dalla distribuzione μ^* — esse non dipendono dai dettagli microscopici contingenti dei singoli stati. La necessità emergente a scala macroscopica non è la necessità logica di Leibniz né la necessità del principio di fatticità di Meillassoux: essa è una *necessità statistica*, prodotta dalla media su un enorme numero di gradi di libertà contingenti. La legge dei gas perfetti $PV = nRT$ non è necessaria nel senso che la sua negazione è contraddittoria; è necessaria nel senso che ogni deviazione da essa, per $N \rightarrow \infty$, ha probabilità che tende a zero esponenzialmente.

Questo caso rivela un quarto tipo di necessità, diverso da quelli già incontrati: la *necessità emergente per aggregazione*. Non è la necessità logica (Leibniz), né la necessità della contingenza (Meillassoux), né la necessità statistica del condizionamento (paradosso di Simpson): è la necessità che sorge quando i gradi di libertà contingenti sono talmente numerosi che le loro fluttuazioni si cancellano a vicenda, producendo regolarità macroscopiche robuste. E tuttavia, anche questa necessità ha un carattere relazionale: essa dipende dal numero N di gradi di libertà e dalla scala di osservazione. Per N piccolo (pochi atomi, poche molecole), le fluttuazioni sono rilevanti e le leggi termodinamiche non sono necessarie ma soltanto statisticamente plausibili. La

necessità emergente si avvicina a 1 asintoticamente, ma non la raggiunge mai in modo assoluto per N finito.

Il parallelismo strutturale con la biologia evolutiva merita di essere reso esplicito, perché non è una semplice analogia retorica ma una struttura matematica comune. Il principio MaxEnt di Jaynes e il paesaggio adattativo di Wright condividono la forma di un medesimo problema: entrambi sono problemi di ottimizzazione vincolata in cui si massimizza una funzione-obiettivo soggetta a vincoli imposti dall'esterno.

Nella termodinamica: si massimizza l'entropia $S[\mu]$ soggetta al vincolo $\langle E \rangle = U$ (energia media costante). Il risultato è la distribuzione di Gibbs $\mu^*(q,p) = \exp(-\beta H) / Z$, concentrata sugli stati di massima entropia vincolata.

Nell'evoluzione biologica: si massimizza la fitness $w(m)$ soggetta ai vincoli imposti dalle leggi della fisica e della chimica (le leggi ottiche per l'occhio, le equazioni di Navier-Stokes per la locomozione in fluido, i vincoli biochimici per le proteine). Il risultato è la concentrazione delle traiettorie evolutive sulle morfologie ai picchi del paesaggio adattativo.

La struttura astratta comune è:

$$m^* = \operatorname{argmax}_{\{m \in \Omega\}} F(m) \text{ soggetto a } C(m) \leq 0$$

dove $F(m)$ è la funzione da massimizzare (entropia o fitness), Ω è lo spazio dei possibili (microstati fisici o morfologie biologiche), e $C(m)$ rappresenta i vincoli (energia media fissa o leggi fisico-chimiche). In entrambi i casi, lo spazio Ω è enormemente vasto — dell'ordine di 10^{23} per un gas macroscopico, e potenzialmente astronomico per lo spazio morfologico — ma la soluzione ottimale è concentrata su un sottoinsieme di misura trascurabile rispetto all'intero spazio. La contingenza microscopica (le singole traiettorie molecolari; le singole mutazioni e derive genetiche) genera, attraverso l'ottimizzazione, una quasi-necessità macroscopica (la distribuzione di Gibbs; le morfologie convergenti).

Questo parallelismo ha un'implicazione filosofica precisa: la convergenza evolutiva documentata da Conway Morris e da McGhee non è soltanto un fatto empirico della paleontologia comparata, ma la manifestazione biologica di un principio più generale che la meccanica statistica ha già dimostrato in ambito fisico. I sistemi complessi sottoposti a vincoli di ottimizzazione tendono verso un numero ristretto di configurazioni macroscopiche stabili, indipendentemente dalla storia microscopica contingente che li ha prodotti. Lo spazio dei microstati contingenti è immenso; lo spazio delle soluzioni macroscopicamente ottimali è ristretto. Questa struttura è la stessa nei due domini, e il suo riconoscimento unifica il dibattito Gould–Conway Morris con il programma jaynesiano in modo che va al di là della metafora.

5.4b La termodinamica del non-equilibrio e la contingenza dei processi dissipativi

Il caso della termodinamica all'equilibrio — presentato nel §5.4 — descrive sistemi che convergono verso uno stato di equilibrio termodinamico stabile. Ma molti dei sistemi più rilevanti per il problema della contingenza — gli organismi viventi, le strutture dissipative, i sistemi economici — sono sistemi *lontani dall'equilibrio* che si mantengono in stati ordinati consumando energia. La termodinamica del non-equilibrio, sviluppata da Ilya Prigogine e collaboratori a partire dagli anni

Sessanta, offre un'analisi di questi sistemi che arricchisce la struttura del continuum N in modo non banale.

I sistemi dissipativi lontani dall'equilibrio possono formare spontaneamente strutture ordinate — strutture dissipative, appunto — quando il flusso di energia che li attraversa supera una certa soglia critica. Le celle di Bénard (convezione termica organizzata in celle esagonali regolari), la reazione di Belousov-Zhabotinskij (oscillazioni chimiche regolari), la formazione degli uragani e la struttura dei cristalli di neve sono esempi di strutture che emergono spontaneamente dall'interazione tra processi dissipativi e fluttuazioni stocastiche.

La struttura di queste transizioni è analoga a quella delle rotture di simmetria descritte nel §5.8: il sistema ha un potenziale con un minimo degenere (molte strutture dissipativamente stabili equivalenti), e una fluttuazione stocastica «sceglie» tra di esse. Il risultato è la medesima asimmetria tra contingenza della scelta (quale struttura si forma dipende da fluttuazioni imprevedibili) e quasi-necessità della struttura (il tipo di struttura che si forma dipende dalle leggi fisiche del sistema). La differenza rispetto all'equilibrio termodinamico è che la struttura dissipativa non è uno stato di minima energia ma uno stato di *minima produzione di entropia compatibile con il mantenimento del flusso energetico* — un principio variazionale più complesso che produce una varietà di strutture ordinate più ricca.

Il collegamento con la biologia evolutiva è diretto: gli organismi viventi sono sistemi dissipativi lontano dall'equilibrio. La loro struttura ordinata è mantenuta dal flusso di energia che li attraversa, e la loro capacità di replicarsi con variazioni è il meccanismo attraverso cui l'evoluzione esplora lo spazio delle strutture dissipative biologicamente possibili. La selezione naturale non è diversa, strutturalmente, dalla selezione termodinamica delle strutture dissipative più stabili: entrambe producono ordine contingente — ordine che avrebbe potuto essere diverso — su uno sfondo di quasi-necessità fisica.

Il parallelo tra termodinamica e biologia evolutiva sviluppato nel §5.4 del saggio è preciso e fruttuoso, ma resta privo di un caso paradigmatico che mostri in modo formalmente limpido come la contingenza microscopica generi necessità macroscopica senza eliminare la prima. La teoria delle rotture spontanee di simmetria (RSdS) offre questo caso paradigmatico, e la sua rilevanza per il problema della contingenza non è stata finora tematizzata in letteratura filosofica con la precisione che merita.

5.8 Il fenomeno della rottura spontanea di simmetria

Un sistema fisico mostra una rottura spontanea di simmetria quando il suo Lagrangiano (o Hamiltoniano) possiede una certa simmetria — tipicamente una simmetria di gauge, una simmetria discreta o una simmetria continua — che non è realizzata dallo stato fondamentale del sistema. L'esempio classico è il ferromagnete: il Lagrangiano del sistema è invariante per rotazione (non vi è una direzione privilegiata dello spazio), ma al di sotto della temperatura di Curie il sistema si magnetizza spontaneamente in una direzione. Quale direzione non è determinata dalle leggi del sistema (che trattano tutte le direzioni allo stesso modo) ma da fluttuazioni quantum-statistiche infinitesimali che «scelgono» una direzione tra le infinite equivalenti.

La struttura formale è la seguente. Consideriamo un sistema descritto da un campo scalare φ con un potenziale:

$$V(\varphi) = -(\mu^2/2)\varphi^2 + (\lambda/4)\varphi^4 \text{ con } \mu^2, \lambda > 0$$

Questo potenziale ha la forma di un «cappello messicano» (o fondo di bottiglia): il punto $\varphi = 0$ è un massimo locale, e il minimo si trova su una varietà continua di stati:

$$\varphi_0 = \pm\sqrt{(\mu^2/\lambda)} \equiv \pm v$$

Il sistema ha una simmetria Z_2 (invarianza per $\varphi \rightarrow -\varphi$), ma il suo stato fondamentale deve scegliere tra $+v$ e $-v$: la simmetria è «rotta» perché lo stato fisico del sistema non realizza la simmetria delle leggi che lo governano.

Il punto filosoficamente cruciale è che questa scelta è genuinamente contingente: non vi è nessuna ragione fisica, in linea di principio, per cui il sistema si magnetizzi in una direzione piuttosto che nell'altra equivalente (in assenza di campo esterno). Le fluttuazioni quantistiche e termiche che determinano la direzione effettiva sono, alla scala rilevante, processi stocastici irriducibili. Eppure, il fatto che il sistema si magnetizzi — che adotti uno stato fondamentale rotto — è necessario: al di sotto della temperatura critica, l'energia libera del sistema è minimizzata da uno stato con $\varphi \neq 0$. Il fenomeno è necessario; quale versione del fenomeno si realizzi è contingente.

5.9 Il teorema di Goldstone e la struttura dei bosoni

La rottura spontanea di simmetria continua ha conseguenze formali che arricchiscono ulteriormente la struttura del continuum N . Quando una simmetria continua è rotta spontaneamente, il teorema di Goldstone (1961) garantisce l'esistenza di bosoni di massa nulla — i bosoni di Goldstone — che corrispondono alle fluttuazioni del campo attorno al minimo del potenziale lungo le direzioni di simmetria rotta. Formalmente, se il gruppo di simmetria G è rotto al sottogruppo H , il numero di bosoni di Goldstone è $\dim(G) - \dim(H)$.

I bosoni di Goldstone sono le modalità di oscillazione del sistema attorno al suo stato fondamentale rotto, e la loro presenza è necessaria — non contingente — come conseguenza del teorema. La direzione in cui avviene la rottura è contingente; la struttura delle oscillazioni attorno a quella direzione è necessaria. Questa asimmetria tra contingenza della rottura e necessità della struttura delle eccitazioni è un'istanza particolarmente limpida del gradiente N : il parametro Σ (scala di osservazione) determina quale aspetto del fenomeno appare contingente e quale necessario.

Alla scala della scelta della direzione di magnetizzazione, N è prossimo a 0: la direzione è casuale, non vi è ragione sufficiente per cui sia questa e non un'altra. Alla scala della struttura delle eccitazioni attorno allo stato fondamentale, N è prossimo a 1: la presenza di bosoni di Goldstone e la loro struttura di dispersione sono necessarie come conseguenza del teorema. Il sistema fisico realizza simultaneamente il massimo della contingenza (scelta della direzione) e il massimo della necessità (struttura delle eccitazioni), a scale distinte.

5.10 Rotture di simmetria e il modello standard: dalla contingenza alla struttura

La rottura spontanea di simmetria ha un ruolo centrale nella fisica delle particelle. Il meccanismo di Higgs — che spiega come le particelle del Modello Standard

acquistino massa — è una rottura spontanea della simmetria elettrodebole $SU(2) \times U(1)_Y$. Il campo di Higgs ha un potenziale del tipo «cappello messicano» nello spazio dei campi, e il suo valore d'aspettativa nel vuoto (VEV, vacuum expectation value) $v \approx 246$ GeV rompe spontaneamente la simmetria, dando massa a $W^\pm$, Z^0 e ai fermioni attraverso l'accoppiamento di Yukawa.

Il valore preciso del VEV — 246 GeV — non è derivato a priori dalla struttura del Modello Standard: esso è un parametro libero della teoria. La sua struttura essenziale (il fatto che vi sia una RSdS con VEV non nullo) è necessaria per la coerenza della teoria; il valore preciso è contingente. Questa struttura — necessità del meccanismo, contingenza del valore — si riproduce in tutti i casi di RSdS ed è formalmente analoga alla struttura del dibattito Gould–Conway Morris: necessità della convergenza morfologica (la struttura ottimale esiste ed è selezionata), contingenza della realizzazione specifica (quale clade la raggiunge e quando).

Il collegamento con la posizione di Meillassoux è diretto. Meillassoux afferma che il VEV potrebbe cambiare senza ragione, e che la sua stabilità osservata non è evidenza della sua necessità perché non si può calcolare la probabilità di tale stabilità su uno spazio campionario non totalizzabile. La risposta disposizionale è che il VEV non è un parametro contingente nel senso meillassouxiano: esso esprime l'identità essenziale del campo di Higgs in questo universo. Un universo con un VEV diverso non sarebbe un universo in cui «le leggi sono cambiate mantenendo inalterate le particelle»; sarebbe un universo con particelle diverse, e forse senza nessuna struttura capace di supportare la complessità. La necessità kripkiana del VEV — necessaria a posteriori come proprietà essenziale del campo di Higgs in questo universo — è insensibile alla critica meillassouxiana.

5.5 La struttura della causalità probabilistica come caso intermedio

Tra la necessità logica assoluta e la contingenza pura esiste una forma intermedia di necessità che la filosofia analitica ha analizzato con grande precisione: la *causalità probabilistica*. Un evento C è causa probabilistica dell'evento E se:

$$P(E | C) > P(E | \neg C)$$

ovvero se la presenza di C aumenta la probabilità di E. Questa relazione è più debole della necessità deterministica (che richiederebbe $P(E | C) = 1$) e più forte della mera contingenza casuale (che richiederebbe $P(E | C) = P(E)$). Essa occupa esattamente lo spazio intermedio del continuum $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ che abbiamo proposto.

La causalità probabilistica è soggetta al paradosso di Simpson e ai problemi del confounding, che rendono la sua identificazione un problema tecnico non banale. Le condizioni di identificazione della causalità probabilistica in presenza di variabili di confusione sono state formalizzate da Judea Pearl attraverso il calcolo do:

$$P(E | \text{do}(C)) \neq P(E | C)$$

dove $\text{do}(C)$ denota l'intervento su C (il suo impostare artificialmente $C = 1$ in un grafo causale), distinto dalla semplice osservazione di C. La differenza tra $P(E | C)$ e $P(E | \text{do}(C))$ misura esattamente il confounding: ciò che appare come necessità causale nell'associazione osservata può essere pura contingenza una volta rimossi i confounder.

Questo calcolo causale di Pearl può essere visto come una formalizzazione matematica precisa del problema filosofico che il paradosso di Simpson aveva sollevato in forma intuitiva. La struttura sottostante è quella di un grafo orientato aciclico (DAG) $G = (V, E)$ in cui i nodi V rappresentano variabili e gli archi E rappresentano relazioni causali dirette. La necessità causale di E dato C è massima quando esiste un percorso causale diretto $C \rightarrow E$ in G non confondibile da altri percorsi; è nulla quando ogni associazione tra C ed E è riconducibile a cause comuni che non coinvolgono C come causa diretta di E .

5.6 Leibniz, Meillassoux e la biologia: un triangolo di posizioni

A questo punto è possibile posizionare con precisione le tre posizioni teoriche principali — Leibniz, Meillassoux, il dibattito Gould–Conway Morris — all'interno del continuum formale proposto.

Leibniz occupa il polo della necessità piena: $N(E, \infty, \Sigma, \Delta) = 1$ per ogni E , ogni scala e ogni contesto. La contingenza che osserviamo è esclusivamente il prodotto di un valore finito di Γ — della nostra incapacità di portare l'analisi a compimento. L'essere è necessario; la mente finita lo percepisce come contingente.

Meillassoux occupa il polo opposto, ma in modo non simmetrico: egli non afferma che $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta) = 0$ per ogni E , ma che $N(E, \infty, \Sigma, \Delta) < 1$ per ogni E empirico e nomologico, mentre $N(\text{Contingenza}, \infty, \Sigma, \Delta) = 1$ come principio di secondo ordine. La contingenza è assoluta a livello degli oggetti; la sua assoluta necessità opera a livello meta-ontologico.

Conway Morris si colloca in una posizione intermedia ma asimmetrica: per certi oggetti privilegiati (le soluzioni convergenti, i picchi larghi del paesaggio adattativo), $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ è prossimo a 1 per Γ, Σ corrispondenti al lungo periodo macroevolutivo; per altri oggetti (le singole traiettorie, i taxon specifici, le contingenze storiche), il valore è prossimo a 0. La posizione di Conway Morris è quella di una necessità *selettiva*: non tutto è necessario, ma alcune strutture lo sono quasi, e precisamente quelle che la fisica e la chimica rendono ottimali.

Gould occupa la posizione speculare: per gli oggetti della storia evolutiva, N è sistematicamente basso, anche su scale lunghe, a causa della struttura path-dependent del processo. La necessità che Conway Morris vede nella convergenza è reale ma limitata a un sottoinsieme piccolo dello spazio morfologico; la maggior parte dello spazio è dominata da contingenza stocastica.

Il risultato di questa triangolazione è che il disaccordo tra queste posizioni non è un disaccordo sui fatti empirici soltanto, né un disaccordo sulle definizioni soltanto: è un disaccordo sulla struttura del gradiente N — su dove esso sia più ripido, su quale sia la sua distribuzione attraverso lo spazio degli oggetti conoscibili.

A questi tre poli è necessario aggiungere, grazie all'analisi svolta nel §1.5, un *quarto polo*: la posizione kripkiana. Kripke occupa una posizione asimmetrica rispetto agli altri tre: la sua necessità essenziale non dipende dal parametro Γ (profondità dell'analisi) nel modo leibniziano, né è contraddetta dal parametro meta-nomologico meillassouxiano. Essa è in un certo senso *ortogonale*: opera a livello dell'identità degli oggetti piuttosto che delle leggi o dei concetti.

In termini del continuum formale, la necessità kripkiana a posteriori corrisponde a una condizione supplementare sulla funzione N:

- (v) Per ogni oggetto x identificato da un designatore rigido e per ogni Δ proprietà P che costituisce l'essenza di x : $N(P(x), \Gamma, \Sigma, \Delta) = 1$ Δ per qualsiasi Γ, Σ, Δ , purché ci si trovi al livello di Δ descrizione appropriato all'identità dell'oggetto.

Questa condizione (v) è indipendente dalle condizioni (i)–(iv): essa non è il limite di un'analisi infinitamente approfondita (non dipende da Γ), non cambia con la scala di osservazione (non dipende da Σ), non è modificata dall'arricchimento del contesto di condizionamento (non dipende da Δ). Essa dipende soltanto dall'identità dell'oggetto e dalla sua struttura essenziale, scoperta a posteriori.

Il triangolo Leibniz–Meillassoux–Gould/Conway Morris diventa così un *tetraedro*: una struttura a quattro poli in cui la posizione kripkiana occupa un vertice indipendente dagli altri tre. Questa ampliamento della figura geometrica non è soltanto un'aggiunta quantitativa — esso rivela che lo spazio concettuale della distinzione necessario/contingente è almeno quattro-dimensionale, e che ogni riduzione a due o tre poli lascia fuori aspetti strutturalmente irriducibili della questione.

5.7 Verso una fenomenologia della necessità: il grado come esperienza

C'è un ultimo aspetto del continuum necessario/contingente che le analisi precedenti non hanno ancora affrontato direttamente, e che riguarda il lato soggettivo dell'esperienza della necessità. La necessità non è soltanto una struttura dell'essere o del discorso: essa è anche un'esperienza cognitiva, una modalità in cui certi contenuti si impongono alla mente come inesorabili, irrecusabili, non suscettibili di essere pensati diversamente.

Questa dimensione esperienziale della necessità non è una questione psicologica marginale. Essa è il punto da cui sia Leibniz che Kant e Hume partono. Per Leibniz, la necessità logica si manifesta nell'evidenza dell'identità: « $A = A$ » è necessariamente vero perché tentare di pensarne il contrario produce una dissoluzione del pensiero stesso. Per Hume, la necessità causale non è mai un'esperienza diretta ma soltanto un'abitudine mentale — una aspettativa prodotta dalla consuetudine e non dall'intuizione di alcuna connessione reale. Per Kant, la necessità è un carattere che la mente impone all'esperienza attraverso le categorie: non è nell'oggetto ma nella forma della sua apprensione.

La fenomenologia della necessità suggerisce che il grado di necessità percepita di un'associazione, di una legge o di un fatto è funzione di almeno tre fattori cognitivi: la frequenza con cui l'associazione è stata osservata (abitudine humeana), la profondità con cui è stata spiegata all'interno di un sistema teorico (coerenza sistemica leibniziana), e l'ampiezza del contraffattuale percepito come possibile (spazio dei mondi possibili accessibili). Quando una legge è osservata sempre, spiegata da una teoria profonda, e il suo contrario appare inconcepibile, essa sembra necessaria. Quando un fatto è osservato raramente, non spiegato, e il suo contrario è facilmente immaginabile, esso sembra contingente.

Questa fenomenologia non risolve la questione metafisica — se la necessità sia nel mondo o nella mente — ma rivela che la distinzione tra necessario e contingente non

è soltanto una proprietà degli stati di cose ma anche una modulazione dell'esperienza cognitiva, variabile con la storia epistemica del soggetto che la coglie. Il che riconduce, ancora una volta, all'ipotesi centrale: la distinzione è di grado, non di natura.

Il saggio si muove prevalentemente nell'ambito della filosofia analitica e del realismo speculativo. La tradizione continentale europea del Novecento ha tuttavia sviluppato analisi della contingenza che sono in molti casi complementari, e talvolta superiori, rispetto agli strumenti analitici disponibili. Non si tratta di una tradizione monolitica: Heidegger, Sartre, Deleuze e Luhmann arrivano alla contingenza da angolazioni radicalmente diverse, e il loro confronto con il continuum N del saggio produce risultati non banali.

5.11 Heidegger: la fatticità del Dasein e la contingenza dell'apertura

In *Essere e Tempo* (1927), Heidegger introduce il concetto di Faktizität — fatticità — per descrivere la condizione esistenziale fondamentale del Dasein: il fatto di essere-già-in-un-mondo determinato, con una determinata lingua, una determinata cultura, un determinato corpo, senza avere scelto nessuno di questi elementi. La fatticità non è la contingenza dei fatti del mondo (la contingenza degli enti intramondani) ma la contingenza dell'apertura stessa — il fatto che il Dasein si trovi sempre già situato in un modo che non può essere il risultato di una scelta, perché ogni scelta presuppone già un'apertura entro cui scegliere.

Questa struttura è distinta dalla contingenza leibniziana e dalla contingenza meillassouxiana, pur con affinità significative con la seconda. Per Leibniz, la contingenza è relativa alla capacità di analisi di una mente finita; la fatticità heideggeriana, al contrario, non è superabile da un'analisi più profonda: non vi è una posizione esterna alla situazione da cui guardare la propria situazione come se fosse un oggetto. La fattualità della situazione del Dasein non è un limite provvisorio dell'analisi ma una struttura costitutiva dell'essere nel mondo.

La connessione con il principio di fatticità di Meillassoux è più stretta: in entrambi i casi, la fatticità designa una struttura irriducibile che non può essere fondata su una ragione sufficiente. Ma il contesto è radicalmente diverso: per Meillassoux, la fatticità è una proprietà ontologica dell'essere in sé, che può essere pensata dall'esterno della correlazione; per Heidegger, la fatticità è una struttura dell'esistenza che non può mai essere pensata dall'esterno, perché ogni pensiero è già situato in una fatticità. Heidegger avrebbe criticato il progetto meillassouxiano come un tentativo di stare al di fuori dell'apertura per osservarla come un oggetto — il che è, per lui, una forma di oggettivazione dell'esistenziale che fraintende la struttura ontologica fondamentale.

Questa critica non è facilmente liquidabile. Il progetto di Meillassoux presuppone la possibilità di pensare la contingenza assoluta come una struttura dell'essere indipendente da qualsiasi soggetto che la pensi. Ma se la Faktizität heideggeriana è strutturalmente anteriore a qualsiasi posizione di soggetto o oggetto, allora ogni pensiero della contingenza assoluta è già situato in una fatticità che lo precede e che esso non può tematizzare senza perdere la propria caratteristica più fondamentale. La contingenza meillassouxiana si rivela, in questa luce, come una tematizzazione dell'in-tematizzabile: ciò che Heidegger chiama la struttura dell'Ereignis — l'evento

dell'apertura — non può essere ridotto a una proprietà dell'essere che si possa enunciare dall'esterno.

5.12 Sartre: la contingenza come struttura dell'en-soi

In *L'être et le néant* (1943), Sartre costruisce una fenomenologia della contingenza che parte da una distinzione ontologica radicale: l'en-soi (l'essere in sé delle cose, privo di negazione, assolutamente positivo) e il pour-soi (l'essere per sé della coscienza, che è sempre negazione e trascendenza dell'en-soi). La contingenza, per Sartre, è la struttura fondamentale dell'en-soi: l'essere è «de trop» — di troppo — ovvero è senza ragione, senza fondamento, senza giustificazione. L'essere non è necessario; esso è, semplicemente, senza perché.

Questa posizione è superficialmente simile a quella di Meillassoux — in entrambi i casi, la contingenza è una struttura ontologica irriducibile — ma la struttura dell'argomento è molto diversa. Sartre non argomenta a partire dalla critica del correlazionismo ma dall'analisi fenomenologica dell'esperienza della nausea (il titolo del suo romanzo): il momento in cui la coscienza si confronta con l'essere nella sua gratuità assoluta, senza poterlo giustificare o fondare. La contingenza non è una tesi metafisica che si argomenta con strumenti formali; è una struttura dell'esistenza che si rivela nell'esperienza.

Il contributo sartreano al problema della contingenza è soprattutto la distinzione tra contingenza dell'en-soi e libertà del pour-soi. La coscienza è radicalmente libera — è, per Sartre, condannata alla libertà — ma questa libertà non è assenza di contingenza: è la capacità di trascendere la situazione contingente (la fatticità, in senso sartriano) senza poter scegliere la situazione di partenza. La libertà opera sulla contingenza come il pour-soi opera sull'en-soi: trasformandolo in progetto senza eliminarne la gratuità. Questa struttura — libertà entro la contingenza, non libertà dalla contingenza — è rilevante per il problema della decisione razionale in condizioni di incertezza, e si collega alla struttura della causalità probabilistica discussa nel §5.5 del saggio.

5.13 Deleuze: virtuale/attuale come alternativa alla coppia possibile/reale

Il contributo filosoficamente più originale alla questione della contingenza nell'ambito della tradizione continentale viene da Gilles Deleuze, che in *Differenza e ripetizione* (1968) e in *Logica del senso* (1969) elabora una distinzione che mette in questione il quadro modale stesso all'interno del quale sia Leibniz sia Meillassoux operano.

La tradizione filosofica dalla logica aristotelica ai mondi possibili di Kripke lavora con la coppia possibile/reale: qualcosa è possibile se non è contraddittorio, e diventa reale quando si istanzia. Il possibile precede il reale logicamente (la possibilità di un oggetto è antecedente alla sua realizzazione) ed ontologicamente (i mondi possibili esistono in qualche senso anche prima che uno di essi venga actualizzato). Deleuze sostituisce questa coppia con la coppia virtuale/attuale. Il virtuale non è il possibile: il possibile ha già la forma del reale che si realizzerà (il possibile è «un reale in meno», diceva Bergson), mentre il virtuale è reale senza essere attuale, e la sua attualizzazione è un processo di differenziazione che produce qualcosa di genuinamente nuovo — non la semplice realizzazione di una forma già data.

Questa distinzione ha conseguenze precise per il problema della contingenza. Nel quadro modale standard, la contingenza di un fatto è la sua possibilità di essere altrimenti: il fatto è contingente perché in qualche mondo possibile non si realizza. La contingenza è definita negativamente, come assenza di necessità. Nel quadro deleuziano, la contingenza è la struttura positiva dell'attualizzazione del virtuale: ogni processo di differenziazione produce qualcosa di nuovo che non era già contenuto nel virtuale come forma data. La contingenza non è l'assenza di ragione (Leibniz) né la struttura dell'assoluto che esclude la ragione (Meillassoux); è la produttività della differenza, il fatto che ogni attualizzazione del virtuale è creazione e non semplice realizzazione.

In termini del continuum $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$, la posizione deleuziana implica che il parametro Γ non possa mai raggiungere il limite leibniziano $N = 1$: ogni analisi più profonda del processo di attualizzazione rivela non più necessità ma più differenza irriducibile. Ma questa irriducibilità non è il «caos» meillassouxiano — non è l'assenza di struttura — bensì la struttura della differenza stessa, che è positiva e generativa. Il gradiente N non converge a 1 per $\Gamma \rightarrow \infty$ (contro Leibniz) né si mantiene uniformemente basso (contro la versione radicale di Meillassoux) ma mostra una struttura complessa in cui l'aumento di Γ rivela nuove differenze invece di ridurle.

Il collegamento con la biologia evolutiva è particolarmente fecondo. L'evoluzione, nella prospettiva deleuziana, è un processo di attualizzazione del virtuale biologico: lo spazio delle morfologie potenziali che le leggi fisiche e chimiche rendono possibili. Ogni organismo è l'attualizzazione di una problematica biologica — come nutrirsi, come difendersi, come riprodursi — e la varietà delle soluzioni evolutive è la differenza interna al virtuale biologico. La convergenza evolutiva documentata da Conway Morris non è la ripetizione dello stesso (la necessità che la stessa forma riemerge) ma la risposta differente alla stessa problematica: l'occhio a lente del polpo e l'occhio a lente dei vertebrati sono due attualizzazioni della stessa problematica visiva, ma che differiscono in ogni dettaglio molecolare e strutturale. La somiglianza è funzionale, la differenza è reale.

5.14 Luhmann: la contingenza come autodescrizione dei sistemi sociali

Niklas Luhmann introduce la contingenza all'interno di una teoria dei sistemi sociali autopoietici che è, per molti aspetti, la trasposizione sociologica più rigorosa della problematica filosofica qui discussa. In *Soziale Systeme* (1984) e poi in *Die Gesellschaft der Gesellschaft* (1997), Luhmann definisce la contingenza come la condizione di tutto ciò che non è né impossibile né necessario: ciò che è, ma avrebbe potuto essere diverso, e che non è necessariamente come è.

Questa definizione è deliberatamente vicina alla definizione logico-modale standard, ma Luhmann la utilizza per un fine diverso: descrivere la struttura dell'auto-osservazione dei sistemi sociali. Un sistema sociale — la scienza, il diritto, l'economia, la religione — si osserva come contingente: le sue operazioni avrebbero potuto essere diverse, i suoi confini avrebbero potuto essere tracciati altrimenti, i suoi codici (vero/falso per la scienza, lecito/illecito per il diritto) avrebbero potuto essere strutturati diversamente. Questa auto-osservazione della contingenza è, per Luhmann,

ciò che distingue i sistemi sociali moderni dai sistemi tradizionali, che si descrivevano come necessari (fondati sulla tradizione, su Dio, sulla natura).

La rilevanza di questa posizione per il continuum N è che Luhmann introduce esplicitamente la contingenza come funzione del parametro Δ (contesto di osservazione): la stessa operazione sociale appare necessaria dall'interno del sistema (data la logica del sistema, l'operazione è l'unica possibile) e contingente dall'esterno (in un altro sistema, la stessa situazione produrrebbe operazioni diverse). Questa relatività sistemica della contingenza è analoga alla dipendenza di N dal contesto di condizionamento Δ : ciò che appare necessario in un contesto si rivela contingente quando si include un'ulteriore variabile sistemica. Il paradosso di Simpson statistico ha il suo analogo sistemico nella struttura luhmanniana dell'auto-osservazione.

Capitolo VI

La meccanica quantistica e il problema della misura: contingenza ontologica o ignoranza epistemica?

6.1 Il caso quantistico come banco di prova radicale

Nessun dominio della fisica ha posto la distinzione tra contingente e necessario sotto una pressione più intensa della meccanica quantistica. Se nella fisica classica la contingenza era tendenzialmente ricondotta all'ignoranza — il lancio di un dado è imprevedibile non perché sia ontologicamente indeterminato, ma perché le condizioni iniziali (posizione, velocità, spin del dado al momento del lancio) sono troppo sensibili per essere misurate con sufficiente precisione — nella meccanica quantistica si è affacciata, per la prima volta nella storia della fisica, la possibilità che l'indeterminatezza sia *ontologica* e non meramente epistemica: che non esistano, nemmeno in linea di principio, variabili nascoste capaci di rendere determinato ciò che la teoria descrive come probabilistico.

L'intensità di questa domanda è tale che i fondatori della meccanica quantistica la affrontarono con posizioni radicalmente divergenti, e il dibattito — lungi dall'essersi chiuso — ha attraversato tutto il Novecento ed è ancora aperto. Einstein, convinto che «Dio non gioca a dadi», sostenne fino alla fine che la meccanica quantistica è una descrizione statistica incompleta di una realtà sottostante deterministica. Bohr, con la sua interpretazione di Copenaghen, sostenne invece che la domanda sulla realtà dei valori del sistema in assenza di misura è priva di significato fisico: la fisica descrive le correlazioni tra preparazioni e misure, non una realtà indipendente dall'atto di misurazione. Tra questi estremi si collocano posizioni intermedie di grande sofisticazione che vale la pena esaminare con precisione.

6.2 Il formalismo: stati, osservabili e la regola di Born

In meccanica quantistica, lo stato di un sistema fisico è rappresentato da un vettore $|\psi\rangle$ in uno spazio di Hilbert $\mathcal{H}$ (o, più precisamente, dalla classe di equivalenza dei vettori che si differenziano per un fattore di fase globale). Ogni grandezza fisica

osservabile è rappresentata da un operatore hermitiano $A : \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$, con la proprietà che $A = A^\dagger$ (dove $A^\dagger$ è l'aggiunto di A). L'operatore hermitiano ha uno spettro reale di autovalori $\{a\}$ con corrispondenti autovettori $\{|a\rangle\}$ che formano una base ortonormale di $\mathcal{H}$:

$$A |a\rangle = a |a\rangle$$

$$\langle a | a \rangle = \delta$$

Uno stato generico $|\psi\rangle$ può essere espanso in questa base:

$$|\psi\rangle = \sum c |a\rangle \text{ con } c = \langle a | \psi \rangle$$

La regola di Born afferma che la probabilità di ottenere il valore a nella misura dell'osservabile A sullo stato $|\psi\rangle$ è:

$$P(A = a | \psi) = |c|^2 = |\langle a | \psi \rangle|^2$$

con la condizione di normalizzazione $\sum |c|^2 = 1$. Il valore atteso dell'osservabile è:

$$\langle A \rangle_\psi = \langle \psi | A | \psi \rangle = \sum a |c|^2$$

Questa struttura è matematicamente analoga a una distribuzione di probabilità su un insieme discreto di valori $\{a\}$, con pesi $\{|c|^2\}$. Ma l'interpretazione fisica di questa analogia è il cuore del problema: i pesi $|c|^2$ rappresentano probabilità di *ignoranza* (come in statistica classica) o probabilità di *indeterminazione ontologica* (come sostiene la lettura ortodossa della meccanica quantistica)?

6.3 Il problema della misura e la catena di von Neumann

Il problema della misura sorge nel momento in cui si cerca di applicare il formalismo quantistico all'atto di misurazione stesso. Se il sistema S è in uno stato di sovrapposizione:

$$|\psi_S\rangle = \sum c |a\rangle$$

e lo si fa interagire con un apparato di misura M , l'interazione quantistica produce un stato entangled del sistema composto $S + M$:

$$|\Psi_{\{S+M\}}\rangle = \sum c |a\rangle_S \otimes |M\rangle_M$$

dove $|M\rangle_M$ è lo stato del puntatore dell'apparato di misura quando ha registrato il valore a . Questo stato entangled è ancora una sovrapposizione: l'apparato non ha un valore definito del puntatore, esattamente come il sistema non aveva un valore definito dell'osservabile. Se si include anche l'osservatore O :

$$|\Psi_{\{S+M+O\}}\rangle = \sum c |a\rangle_S \otimes |M\rangle_M \otimes |O\rangle_O$$

Questa è la *catena di von Neumann*: l'entanglement si propaga dal sistema all'apparato all'osservatore, e non c'è nessun punto nella catena in cui la sovrapposizione collassa spontaneamente in un singolo termine. Eppure, nell'esperienza, ogni misura produce un risultato definito — un singolo valore a , non una sovrapposizione di valori.

La questione è dunque: dove e come avviene il collasso? E questo collasso è un processo fisico reale (ontologico) o una trasformazione della descrizione dovuta all'acquisizione di informazione (epistemica)?

6.4 L'interpretazione di Copenaghen e il suo silenzio strategico

L'interpretazione di Copenaghen, nelle sue diverse versioni (Bohr, Heisenberg, von Neumann con il taglio), risponde alla domanda del collasso con un argomento che è, in sostanza, un rifiuto di rispondervi. La funzione d'onda non descrive una realtà fisica

oggettiva indipendente dall'osservazione: essa è uno strumento di calcolo per predire le probabilità dei risultati delle misure. Chiedersi quale sia lo stato del sistema *tra* una misura e l'altra è, da questa prospettiva, una domanda priva di significato fisico.

Questa postura ha una struttura filosoficamente riconoscibile: essa è una forma di correlazionismo ante litteram. Ciò che è fisicamente significativo non è lo stato del sistema in sé, ma la correlazione tra lo stato preparato e il risultato della misura. L'atto di misurazione è il momento in cui la fisica si connette con l'esperienza, e al di fuori di questo momento di connessione non vi è nulla di fisicamente descrivibile. Bohr era esplicito su questo: il linguaggio della fisica classica è necessario per descrivere le condizioni sperimentali, e senza tale descrizione classica il sistema quantistico non ha proprietà definite.

Il parallelo con il correlazionismo di Meillassoux è evidente. Meillassoux criticava il correlazionismo perché, rinunciando all'accesso alla realtà in sé, non può rendere conto degli enunciati sulle proprietà del mondo *prima* che esistessero osservatori — gli enunciati che egli chiama *ancestrali* (la datazione della formazione della Terra, l'età dell'universo). Analogamente, l'interpretazione di Copenaghen non può rendere conto del comportamento quantistico del sistema solare prima che esistessero fisici capaci di costruire apparati di misura.

6.5 L'interpretazione a molti mondi di Everett e la contingenza ramificata

Hugh Everett propose nel 1957 un'alternativa radicale: eliminare il collasso della funzione d'onda come processo fisico speciale, e trattare l'equazione di Schrödinger come universalmente valida — anche durante le misure e anche per sistemi macroscopici, inclusi gli osservatori. Il risultato è che, invece del collasso a un singolo termine, tutti i termini della sovrapposizione si realizzano, ma in rami del tutto separati dell'universo:

$$|\Psi_{\{S+M+O\}}\rangle = \sum c |a\rangle_S \otimes |M\rangle_M \otimes |O\rangle_O$$

non collassa: ogni termine $|a, M, O\rangle$ è un ramo in cui l'osservatore ha visto il risultato a , e tutti questi rami coesistono nella funzione d'onda universale. La misura non seleziona un esito tra molti: crea una ramificazione in tanti rami quanti sono gli autovalori con coefficienti non nulli.

L'interpretazione everettiana ha conseguenze profonde per il problema della contingenza. In questa prospettiva, non esiste la contingenza nel senso di Leibniz — la possibilità che le cose potessero essere andate altrimenti. Tutto ciò che può accadere, accade: tutti i rami si realizzano. La funzione d'onda universale evolve deterministicamente secondo l'equazione di Schrödinger, e non vi è alcuna contingenza ontologica nel processo fisico. Tuttavia, ogni osservatore che abita un ramo specifico esperisce un esito definito, e da quella prospettiva interna gli altri rami sono inaccessibili — sono, per quell'osservatore, il correlato fisico dei «mondi possibili non attuali» di Leibniz.

Il problema con l'interpretazione di Everett è giustificare la regola di Born: se tutti i rami si realizzano, perché dovremmo assegnare probabilità $|c|^2$ ai diversi esiti piuttosto che probabilità uguali? La risposta più sviluppata è quella di David Deutsch e successivamente di David Wallace, che tentano di derivare la regola di Born dall'analisi decisionale: un osservatore razionale che si trovi di fronte a una ramificazione

everettiana dovrebbe distribuire le sue aspettative in proporzione ai moduli quadrati dei coefficienti. Questa derivazione è tecnicamente sofisticata e rimane controversa.

6.6 Il teorema di Bell e la non-separabilità: contingenza correlata

Il contributo sperimentalmente più rilevante al problema della contingenza in meccanica quantistica è il teorema di Bell (1964) e le sue verifiche sperimentali successive. Il teorema affronta la domanda: è possibile completare la meccanica quantistica con *variabili nascoste locali* — variabili che determinerebbero con certezza i risultati delle misure, riportando la meccanica quantistica nell'alveo del determinismo classico (e della contingenza come pura ignoranza)?

La risposta di Bell è negativa, sotto l'assunzione di *località*. Si consideri una coppia di particelle in uno stato di entanglement di spin (stato di singoletto):

$$|\Psi\rangle = (1/\sqrt{2})(|\uparrow\rangle_A \otimes |\downarrow\rangle_B - |\downarrow\rangle_A \otimes |\uparrow\rangle_B)$$

Le due particelle sono inviate a due rilevatori separati nello spazio, che misurano lo spin lungo direzioni scelte indipendentemente. Siano a e b i versori delle direzioni di misura ai rilevatori A e B , e siano $A(a, \lambda)$ e $B(b, \lambda)$ i risultati (± 1) delle misure, dove λ rappresenta l'insieme delle ipotetiche variabili nascoste locali.

Bell dimostrò che qualsiasi teoria a variabili nascoste locali deve soddisfare la disuguaglianza:

$$|E(a,b) - E(a,b')| + |E(a',b) + E(a',b')| \leq 2$$

dove $E(a,b) = \int A(a,\lambda) B(b,\lambda) \rho(\lambda) d\lambda$ è il valore atteso del prodotto dei risultati per direzioni di misura a e b , e $\rho(\lambda)$ è la distribuzione delle variabili nascoste.

La meccanica quantistica predice, per opportune scelte delle direzioni (a, a', b, b'):

$$|E(a,b) - E(a,b')| + |E(a',b) + E(a',b')| = 2\sqrt{2} \approx 2.83$$

che viola la disuguaglianza di Bell. Le verifiche sperimentali — in particolare gli esperimenti di Aspect (1982), poi gli esperimenti a chiusura di loophole di Hensen et al. (2015) e dei gruppi di Delft, Vienna e NIST — hanno confermato le predizioni quantistiche con altissima significatività statistica, escludendo le teorie a variabili nascoste locali.

La violazione delle disuguaglianze di Bell implica che almeno uno dei due assunti — determinismo (esistenza di variabili nascoste) o località (indipendenza dei risultati ai due rilevatori separati) — deve essere abbandonato. La fisica ha scelto quasi universalmente di mantenere il non-determinismo e abbandonare il determinismo nascosto, interpretando la violazione come prova che la contingenza dei risultati quantistici è genuinamente ontologica e non riducibile a ignoranza sulle variabili nascoste.

6.7 La decoerenza e la contingenza selettiva

Uno degli sviluppi più importanti nella comprensione del confine tra mondo quantistico e mondo classico è la teoria della *decoerenza*, sviluppata sistematicamente da Wojciech Zurek a partire dagli anni Ottanta. La decoerenza non risolve il problema della misura — non spiega perché si ottenga un risultato definito piuttosto che un altro — ma spiega *perché* il mondo macroscopico appaia classico nonostante sia composto di oggetti quantistici.

Il meccanismo è il seguente. Ogni sistema macroscopico S è in costante interazione con l'ambiente E (fotoni, fononi, molecole d'aria). Questa interazione produce un entanglement rapido tra S e E :

$$|\psi_S\rangle \otimes |E_0\rangle \rightarrow \sum c |s\rangle_S \otimes |E\rangle_E$$

Poiché i diversi stati ambientali $|E\rangle$ hanno un overlap che decade esponenzialmente nel tempo:

$$\langle E | E \rangle \sim \exp(-\Gamma_{nm} t) \text{ per } n \neq m$$

dove Γ_{nm} è il tasso di decoerenza tra i rami n e m , la matrice di densità ridotta del sistema, ottenuta tracciando sull'ambiente, diventa rapidamente diagonale nella base dei puntatori (*pointer basis*):

$$\rho_S(t) = \text{Tr}_E[|\Psi_{S+E}\rangle\langle\Psi_{S+E}|] \rightarrow \sum |c|^2 |s\rangle\langle s| \text{ per } t \gg 1/\Gamma$$

La matrice di densità diagonale è formalmente identica a un *ensemble* classico: un insieme statistico di stati definiti $|s\rangle$ con probabilità $|c|^2$. I termini fuori-diagonale — che rappresentano le interferenze quantistiche, la coerenza tra i rami — decadono su scale temporali straordinariamente brevi per sistemi macroscopici (tipicamente 10^{-23} secondi per oggetti di scala molecolare a temperatura ambiente).

La decoerenza ha un'implicazione diretta per il problema della contingenza. Essa mostra che la distinzione tra comportamento quantistico (contingenza ontologica, sovrapposizione, interferenze) e comportamento classico (apparente determinismo o contingenza epistemica) non è una distinzione ontologica assoluta ma una distinzione relativa alla scala di osservazione e al grado di isolamento del sistema dall'ambiente. Sistemi piccoli e ben isolati mostrano interferenze quantistiche e contingenza ontologica; sistemi grandi e fortemente interagenti con l'ambiente mostrano, su scale di tempo accessibili, un comportamento indistinguibile da quello classico. La frontiera tra quantistico e classico è, ancora una volta, un gradiente — questa volta determinato dal rapporto tra la scala di decoerenza $1/\Gamma$ e la scala temporale delle osservazioni.

Il parallelismo con la convergenza evolutiva può ora essere reso formalmente esplicito, andando oltre la semplice analogia. In entrambi i casi — la decoerenza fisica e la convergenza biologica — si osserva il medesimo fenomeno: la molteplicità dei possibili viene soppressa dall'interazione con l'ambiente, e l'esito si restringe a un insieme molto più piccolo di stati privilegiati.

Nella decoerenza: la sovrapposizione quantistica $|\psi_S\rangle = \sum c |s\rangle$, che include contributi da tutti gli autostati possibili di S , viene ridotta dall'interazione con l'ambiente alla *pointer basis* — un insieme discreto di stati classici $|s\rangle$ stabili rispetto all'interazione ambientale. Non è la fisica interna del sistema a scegliere questi stati: sono le proprietà dell'ambiente — la struttura delle sue interazioni con S — che selezionano quali stati sopravvivono alla decoerenza. L'*einselection* (environment-induced superselection) di Zurek è precisamente questo: la selezione da parte dell'ambiente di un sottoinsieme ristretto degli stati quantistici possibili.

Nella convergenza biologica: la varietà delle morfologie possibili nello spazio M — che include potenzialmente un numero vastissimo di architetture corporee — viene ridotta dall'interazione con l'ambiente fisico e chimico (i vincoli delle leggi ottiche, idrodinamiche, biochimiche) a un insieme ristretto di forme ottimali — i picchi del paesaggio adattativo di Conway Morris. Non è la storia interna del lignaggio a determinare la forma finale: sono le proprietà dell'ambiente fisico che selezionano quali morfologie sono stabili rispetto alla selezione naturale.

La struttura matematica comune può essere espressa attraverso un operatore di selezione ambientale E_{sel} che agisce su uno spazio di stati Ω :

$E_{\text{sel}} : \mathcal{P}(\Omega) \rightarrow \mathcal{P}(\Omega_{\text{sel}})$ con $\Omega_{\text{sel}} \subset \Omega$ e $|\Omega_{\text{sel}}| \ll |\Omega|$

dove $\mathcal{P}(\Omega)$ è l'insieme delle distribuzioni di probabilità su Ω e Ω_{sel} è il sottoinsieme degli stati «selezionati» dall'ambiente — gli stati puntatore nella fisica, le morfologie convergenti nella biologia. In entrambi i casi, l'azione di E_{sel} riduce la contingenza (la libertà di occupare qualsiasi punto di Ω) verso la quasi-necessità (l'occupazione di Ω_{sel} indipendentemente dalla storia precedente del sistema).

Questo parallelismo non è una metafora: esso rivela che la contingenza — sia a livello quantistico che biologico — non è una proprietà intrinseca dei sistemi ma una proprietà *relazionale*, determinata dall'interazione tra il sistema e il suo ambiente. Un sistema isolato dall'ambiente mostra la massima contingenza (sovrapposizione quantistica; deriva genetica pura); un sistema fortemente interagente con un ambiente strutturato mostra la minima contingenza (classicità; convergenza morfologica). Il gradiente $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ trova qui la sua realizzazione più concreta: il parametro Δ (contesto di condizionamento) deve includere non soltanto le variabili osservate ma l'intero ambiente che agisce come selettore degli stati privilegiati. Zurek e Conway Morris, pur lavorando in domini radicalmente diversi con strumenti radicalmente diversi, descrivono la stessa struttura fondamentale: l'ambiente come riduttore della contingenza, il mondo fisico come macchina che seleziona i possibili e trasforma la libertà dei microstati nella quasi-necessità dei macrostati.

6.8 Il principio di indeterminazione e i suoi limiti filosofici

Il principio di indeterminazione di Heisenberg è spesso citato come la formulazione più diretta della contingenza ontologica in fisica. Nella sua forma più precisa, per le osservabili di posizione q e quantità di moto p (coniugate canonicamente con $[q, p] = i\hbar$), esso afferma:

$$\sigma_q \cdot \sigma_p \geq \hbar/2$$

dove σ_q e σ_p sono le deviazioni standard delle distribuzioni di probabilità di q e p nello stato $|\psi\rangle$, e $\hbar = h/(2\pi)$ è la costante di Planck ridotta. Analogamente, per energia e tempo:

$$\sigma_E \cdot \sigma_t \geq \hbar/2$$

Queste disuguaglianze affermano che non è possibile preparare uno stato in cui sia q che p abbiano valori arbitrariamente precisi. Ma è importante precisare il senso: il principio di indeterminazione non dice che q e p abbiano valori definiti ma non misurabili con precisione arbitraria (limite epistemico); dice che in uno stato quantistico non esistono valori definiti di q e p simultaneamente — è lo stato stesso che non ha tali proprietà (limite ontologico).

Questa interpretazione ontologica è però problematica per la posizione (ma non per il momento): l'operatore di posizione ha autovettori ben definiti (le distribuzioni delta di Dirac $|x\rangle$), e nulla impedisce in linea di principio di preparare uno stato con posizione arbitrariamente ben definita (sebbene a prezzo di un'indeterminazione di momento illimitata). La contingenza quantistica non è dunque una contingenza uniforme che pervade tutte le grandezze fisiche allo stesso modo; essa è strutturata, distribuita in modo disomogeneo attraverso le diverse osservabili e i diversi tipi di stati.

6.9b La meccanica quantistica relazionale di Rovelli: contingenza come relazionalità

Una delle interpretazioni più filosoficamente sofisticate della meccanica quantistica, e quella che si connette più direttamente con il continuum N, è la *meccanica quantistica relazionale* (QM relazionale) di Carlo Rovelli (1996). Il principio fondamentale è che le proprietà fisiche non sono proprietà assolute degli oggetti ma proprietà *relative a osservatori*: il valore di una grandezza fisica per un oggetto S è definito solo rispetto a un sistema di riferimento R che interagisce con S. Diversi osservatori possono attribuire diversi stati a S senza contraddizione, perché i loro stati si riferiscono a interazioni diverse con S.

Il «collasso della funzione d'onda» non è un processo fisico assoluto ma la descrizione dell'acquisizione di informazione da parte di un osservatore specifico. Rispetto a R che ha già interagito con S, l'evento quantistico è definito (il risultato è a): $N(\text{risultato}, \Gamma, \Sigma, \{R\}) = 1$. Rispetto a R' che non ha ancora interagito né con S né con R, lo stato di $S \otimes R$ è ancora in sovrapposizione: $N(\text{risultato}, \Gamma, \Sigma, \{R'\}) < 1$. La stessa proprietà fisica è necessaria rispetto a un osservatore e contingente rispetto a un altro — esattamente la struttura del parametro Δ (contesto di condizionamento) nel continuum N.

La QM relazionale offre una risposta elegante al problema della misura: il «collasso» non è un evento fisico obiettivo ma una transizione di prospettiva, analoga al passaggio da un sistema di riferimento a un altro in relatività speciale. Questa risposta ha un costo: rinuncia all'idea che vi sia uno stato assoluto del mondo indipendente da qualsiasi osservatore — posizione che il realista scientifico trovava allettante nella meccanica quantistica. Ma il costo è esattamente il riconoscimento che la distinzione tra contingente e necessario è relazionale: ciò che è necessario rispetto a un sistema di riferimento fisico può essere contingente rispetto a un altro, e questa relativizzazione non è soggettivismo ma struttura obiettiva delle interazioni fisiche.

6.9 Contingenza quantistica e contingenza meillassouxiana: un confronto riarticolato

Il parallelismo tra la contingenza ontologica della meccanica quantistica e la contingenza assoluta di Meillassoux è suggestivo ma richiede una distinzione strutturale precisa che la letteratura non ha sempre reso esplicita. La differenza non è di grado ma di livello nomologico, e vale la pena articolare su tre piani distinti.

Primo piano: la contingenza quantistica opera all'interno di leggi necessarie.

La regola di Born, l'equazione di Schrödinger, il principio di indeterminazione sono leggi invariabili che governano la *distribuzione* delle contingenze. I singoli risultati delle misure sono contingenti — non vi è nessuna informazione, nemmeno in linea di principio, che li determini in anticipo — ma la distribuzione di questi risultati è necessaria. Se si eseguono 10.000 misure di spin su particelle in un medesimo stato di sovrapposizione, la proporzione di esiti «su» converge con certezza statistica verso il valore $|c_{\uparrow}|^2$ prescritto dalla regola di Born. La meccanica quantistica offre dunque un'istanza della necessità emergente per aggregazione introdotta nel Capitolo V: i singoli eventi sono contingenti (Σ = scala degli eventi individuali), ma la distribuzione statistica è necessaria (Σ = scala delle popolazioni di eventi). Il gradiente $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$

ha qui un profilo preciso: basso per i singoli eventi di misura, alto per le distribuzioni statistiche.

Secondo piano: la contingenza meillassouxiana riguarda le leggi stesse, non i fenomeni entro le leggi. Meillassoux sostiene che non vi è ragione per cui le stesse leggi — inclusa la regola di Born, inclusa l'equazione di Schrödinger — siano quelle che sono: esse sono contingenti al pari dei fenomeni che governano. Questa è la differenza radicale rispetto alla meccanica quantistica: la QM presuppone la stabilità delle sue leggi e afferma la contingenza dei fenomeni *entro* quelle leggi; Meillassoux nega la stabilità delle leggi stesse. Si tratta di una differenza di livello nomologico, non di grado. Nel continuum formale: la meccanica quantistica afferma $N(\text{Legge_Born}, \Gamma, \Sigma, \Delta) \approx 1$; Meillassoux afferma $N(\text{Legge_Born}, \Gamma, \Sigma, \Delta) < 1$ in modo irriducibile.

Terzo piano: l'evidenza empirica lavora contro Meillassoux, sebbene in modo non definitivo. La straordinaria precisione con cui le predizioni della teoria quantistica sono verificate sperimentalmente costituisce una forma di evidenza per la stabilità nomologica che l'ipercaos fatica a spiegare. La costante di struttura fine calcolata in elettrodinamica quantistica (QED) coincide con quella misurata sperimentalmente fino alla decima cifra decimale: $\alpha_{\text{teo}} = 0.0072973525693$ contro $\alpha_{\text{sper}} = 0.0072973525714$ (Hanneke et al., 2008). Le previsioni della cromodinamica quantistica per le interazioni ad alta energia sono verificate nell'intervallo di 10^{-4} . Un sistema che potesse realmente subire variazioni nomologiche arbitrarie — come implica l'ipercaos — dovrebbe mostrarle su almeno alcune delle scale temporali accessibili alla sperimentazione, e non le mostra.

La risposta standard di Meillassoux — che la stabilità osservata non è improbabile perché non si può definire uno spazio campionario su cui calcolare la probabilità — è formalmente corretta ma epistemicamente insatisfacente per due ragioni. Prima ragione: il fatto che non si possa *calcolare* la probabilità della stabilità non implica che la stabilità non costituisca *evidenza* di qualcosa — la struttura bayesiana dell'inferenza non richiede uno spazio campionario totalizzabile, ma solo una funzione di verosimiglianza, che la storia della fisica fornisce abbondantemente. Seconda ragione: la coerenza interna delle teorie fisiche — il fatto che la regola di Born sia compatibile con l'equazione di Schrödinger, che le simmetrie di gauge siano compatibili con il modello standard, che la termodinamica sia derivabile dalla meccanica statistica — suggerisce una struttura nomologica con una profondità e una coerenza che va oltre la semplice stabilità statistica di fatto. L'argomento cantoriano impedisce di quantificare questa evidenza in termini probabilistici, ma non la neutralizza.

In conclusione, la contingenza quantistica contribuisce al problema filosofico in un modo che né Leibniz né Meillassoux avevano anticipato: essa mostra che la contingenza può essere *strutturata* — non uniforme, non caotica, ma distribuita secondo leggi precise che la misurazione può verificare con precisione straordinaria. Questa contingenza strutturata è un sesto tipo di necessità nel catalogo che il saggio ha costruito progressivamente: non la necessità logica (Leibniz), non la necessità della contingenza (Meillassoux), non la necessità statistica del condizionamento (paradosso di Simpson), non la necessità emergente per aggregazione (termodinamica/biologia), non la necessità essenziale kripkiana, ma la *necessità nomologica della distribuzione della contingenza* — il fatto che i fenomeni contingenti siano distribuiti secondo leggi che si rivelano straordinariamente stabili pur non avendo, all'interno del sistema fisico stesso, un fondamento di necessità logica assoluta.

Capitolo VII

Il dibattito nella letteratura secondaria e i rimandi trasversali tra i domini

7.1 La tradizione analitica su Leibniz: Mates e Adams

La ricezione analitica del pensiero leibniziano ha prodotto due contributi di riferimento che vale la pena esaminare separatamente, poiché essi affrontano la struttura della contingenza da angolazioni complementari.

Benson Mates, nel suo studio sistematico sulla filosofia di Leibniz pubblicato nel 1986, si concentra sulla struttura logica del pensiero leibniziano con una precisione che nessun interprete precedente aveva raggiunto. Mates ricostruisce con meticolosità il principio *praedicatum inest subiecto* — la dottrina che il predicato di ogni proposizione vera sia contenuto nel soggetto — e ne segue le implicazioni per la bipartizione tra necessità e contingenza. La sua analisi mostra che Leibniz deve mantenere contemporaneamente due tesi che sembrano in tensione: da un lato, ogni verità contingente ha una ragione sufficiente che la rende vera (e dunque la rende in qualche senso inevitabile, dato il concetto completo del soggetto); dall'altro, la negazione di una verità contingente non è contraddittoria, il che preserva la libertà logica. Mates chiarisce che questa tensione viene risolta da Leibniz attraverso la distinzione tra analiticità in un numero finito di passi (necessità) e analiticità in un numero infinito di passi (contingenza) — ma segnala anche che questa distinzione è più fragile di quanto Leibniz ammetta: non vi è un criterio indipendente per stabilire se un'analisi è finita o infinita senza già sapere se la proposizione in questione è necessaria o contingente.

Questo è un punto critico di grande importanza che il Capitolo I del presente saggio aveva toccato ma non sviluppato pienamente. Il criterio di distinzione tra necessario e contingente — finitezza vs. infinità dell'analisi — è intrinsecamente circolare: per sapere se l'analisi di P richiede infiniti passi, devo già sapere se P è contingente. La distinzione leibniziana non offre dunque un metodo di classificazione applicabile a priori, ma soltanto una descrizione post hoc della struttura logica dei due tipi di verità. Robert Adams, in uno studio del 1994 che affronta Leibniz come determinista, teologo e idealista, approfondisce la tensione tra la dottrina dei concetti completi e la libertà umana con strumenti della logica modale contemporanea. Adams distingue tre tipi di necessità in Leibniz — la necessità assoluta (vera in tutti i mondi possibili), la necessità ipotetica (vera in tutti i mondi compatibili con la decisione creativa di Dio) e la necessità morale (la «forza» con cui il principio del meglio inclina senza necessitare) — e mostra che la libertà umana, in Leibniz, deve essere compatibile con la necessità ipotetica ma non con quella assoluta. Un agente è libero se avrebbe potuto agire diversamente in *qualche* mondo possibile, anche se non nel mondo attuale.

Questa distinzione ha una conseguenza rilevante per il problema della contingenza: nella concezione adamsiana di Leibniz, la contingenza è sempre contingenza *rispetto a un insieme di mondi possibili*, e questo insieme varia a seconda del tipo di necessità considerato. La contingenza non è quindi una proprietà monolitica ma una famiglia di proprietà modali indicizzate all'insieme dei mondi rispetto al quale si valuta la

possibilità alternativa. Questo schema si integra naturalmente con il continuum $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ proposto nel Capitolo V: il parametro Δ (contesto di condizionamento) cattura esattamente la scelta dell'insieme di mondi rispetto al quale si valuta la contingenza.

7.2 Badiou come sfondo e come contraltare di Meillassoux

Quentin Meillassoux fu allievo di Alain Badiou all'École Normale Supérieure, e il progetto di *Après la finitude* non può essere compreso pienamente senza tenere conto dell'ontologia matematica di Badiou, alla quale reagisce in modo complesso — insieme dipendente e critico.

Badiou aveva sostenuto, nel suo opus magnum del 1988 *L'Être et l'événement*, che l'ontologia — la scienza dell'essere in quanto essere — si identifica con la matematica, e più specificamente con la teoria degli insiemi di Zermelo-Fraenkel. L'essere è molteplicità pura, e la matematica degli insiemi è il discorso che articola questa molteplicità senza ricorrere a un Uno fondante. Ogni presentazione dell'essere è strutturazione di una molteplicità in situazione; il vuoto (l'insieme vuoto $\emptyset$) è il fondamento al-fondamento di ogni struttura. L'evento — la categoria centrale dell'etica e della politica in Badiou — è un'eccedenza sull'essere strutturato, un elemento che non è presentato nella situazione ma che la trasforma quando viene nominato.

Meillassoux eredita da Badiou la matematizzazione dell'ontologia e il ricorso alla teoria degli insiemi di Cantor. Ma mentre per Badiou la matematica articola l'essere strutturato, per Meillassoux la matematica — e in particolare la teoria cantoriana della gerarchia degli infiniti e il teorema sull'inesistenza di un insieme universale — articola la struttura della contingenza assoluta. Il teorema di Cantor sull'insieme potenza, che Meillassoux utilizza per mostrare l'impossibilità di totalizzare lo spazio dei possibili, è già presente nell'ontologia di Badiou come strumento per pensare l'eccedenza del potere dello stato ($2^{|S|} > |S|$) sulla presentazione della situazione.

La differenza strutturale tra i due progetti è però significativa. Per Badiou, l'evento è aleatorio e singolare, ma le conseguenze della fedeltà a un evento si dispiegano secondo procedure di verità che hanno una forma di necessità interna: la matematica, l'amore, la politica, l'arte producono, nell'immanenza delle loro procedure, verità universali. Per Meillassoux, la contingenza è assoluta e non genera necessità nemmeno attraverso le procedure di verità: le leggi fisiche potrebbero cambiare senza preavviso, e nessuna fedeltà a un evento può neutralizzare questa possibilità radicale.

È notevole che Badiou abbia scritto la prefazione alla prima edizione di *Après la finitude*, salutando la proposta meillassouxiana come un superamento dell'empirismo trascendentale e un passo verso un razionalismo radicale. Questa approvazione è però misurata: Badiou condivide con Meillassoux il progetto di pensare l'assoluto senza teologia, ma non condivide la tesi che la contingenza sia l'ultima parola sull'essere. Per Badiou, l'evento è contingente nella sua occorrenza ma le verità che ne derivano sono necessarie nella loro universalità.

7.3 La risposta della logica paraconsistente: Graham Priest

Graham Priest ha sviluppato nel corso di decenni una logica — la logica paraconsistente, e in particolare la teoria del dialetheismo — che ammette proposizioni vere e false simultaneamente (*true contradictions*) senza che questo porti alla trivialità (da una contraddizione non si deriva qualsiasi proposizione, come avviene nella logica classica). Il sistema logico rilevante è LP (Logic of Paradox), in cui il principio ex contradictione quodlibet non vale:

In logica classica: $P \wedge \neg P \vdash Q$ per qualsiasi Q

In LP: $P \wedge \neg P \not\vdash Q$ in generale

Questa struttura ha conseguenze rilevanti per il problema della contingenza in Meillassoux. Meillassoux utilizza l'argomentazione modale per mostrare che la necessità della contingenza non contraddice la contingenza di ogni cosa: la necessità opera a un livello meta-ontologico, la contingenza a livello degli oggetti. Ma questa separazione di livelli è più difficile da mantenere di quanto sembri, e produce strutture che assomigliano a paradossi dell'autoreferenza.

Priest ha argomentato, in vari contesti, che i limiti del pensiero — le strutture che si trovano al bordo di ciò che è pensabile — generano contraddizioni genuine che non possono essere dissolte con distinzioni di livello: il tentativo di pensare la totalità di tutti i pensieri, la realtà in sé al di là di ogni correlazione, l'insieme di tutti gli insiemi, produce strutture dialeteiche che la logica classica non riesce ad ospitare.

Dal punto di vista della contingenza, l'argomento priesteano suggerisce che la tesi meillassouxiana — necessariamente tutto è contingente — potrebbe essere, in un senso preciso, contraddittoria: la necessità della contingenza è una forma di necessità (e quindi nega la contingenza di tutto) e insieme una forma di contingenza (se la contingenza fosse diversamente strutturata, potrebbe non essere necessaria). La logica paraconsistente non ritiene questa contraddizione letale; anzi, la considera un carattere strutturale del pensiero al suo bordo. Ma questo implica che l'argomentazione meillassouxiana non può appoggiarsi alla logica classica senza incappare in difficoltà, e deve invece essere ricostruita in un framework logico più tollerante alle contraddizioni.

7.4 La convergenza evolutiva nella letteratura biologica: McGhee e i limiti della forma

George McGhee ha offerto, in una monografia del 2011 interamente dedicata alla convergenza evolutiva, la rassegna più sistematica e quantitativamente ricca della letteratura biologica su questo tema. Il punto centrale della sua analisi è che la convergenza non è un fenomeno eccezionale o limitato a pochi casi emblematici: essa pervade l'intero albero della vita, dalle strutture molecolari (le stesse sequenze di aminoacidi vengono selezionate indipendentemente in proteine non omologhe con funzioni analoghe) alle architetture di organi, ai piani corporei, alle nicchie ecologiche.

McGhee articola una distinzione che è filosoficamente rilevante: quella tra *convergenza funzionale* e *convergenza strutturale*. La convergenza funzionale — il fatto che funzioni simili vengano realizzate indipendentemente — è attesa anche in un mondo gouldiano: se un problema adattativo è abbastanza comune (vedere, volare, termoregolare), ci aspettiamo che venga risolto molte volte. Ma la convergenza strutturale — il fatto che soluzioni strutturalmente simili vengano scelte per realizzare

funzioni simili — è molto più forte: essa implica che lo spazio delle soluzioni strutturali efficienti sia ristretto, non soltanto che i problemi siano ricorrenti.

L'evidenza più potente per la convergenza strutturale, secondo McGhee, viene dalle forme matematiche. Le leggi fisiche che governano la locomozione acquatica producono la stessa forma fusiforme (corpo torpediforme con rapporto lunghezza/larghezza ottimale per minimizzare la resistenza idrodinamica) in pesci (tonni, squali), mammiferi (delfini, orche) e rettili estinti (ittiosauri). La forma ottimale, determinata dalle leggi della fluidodinamica, è un attrattore dello spazio delle forme: l'equazione di Navier-Stokes, applicata alla locomozione in fluido incompressibile, seleziona un'architettura geometrica precisa. Questa selezione non è biologica — è fisica. La biologia deve poi realizzare quella forma con i materiali disponibili (osso, cartilagine, muscolo), e le diverse soluzioni costruttive sono contingenti; ma la forma target è quasi-necessaria in quanto determinata da leggi fisiche invariabili.

Il risultato di McGhee integra precisamente il dibattito Gould–Conway Morris trattato nel Capitolo IV: esso sposta il peso dell'argomentazione dalla questione storica (avrebbe l'occhio evoluto di nuovo?) alla questione strutturale (quale forma tende a emergere in nicchie fisicamente definite?). Questa distinzione riformula il problema della contingenza in termini di distinzione tra contingenza costruttiva (come si realizza la forma) e quasi-necessità morfologica (quale forma viene realizzata), separando due livelli che nel dibattito originario erano stati trattati come un unico problema.

Letto alla luce del parallelismo termodinamica-biologia sviluppato nel §5.4, il risultato di McGhee acquista una profondità aggiuntiva: esso non è soltanto un catalogo di casi paralleli, ma una dimostrazione che la convergenza biologica opera a un livello fisico — le leggi di Navier-Stokes per la forma dei corpi acquatici, le equazioni ottiche per gli occhi a lente, i vincoli biochimici per i pigmenti fotorecettori — che è matematicamente isomorfo alla struttura di ottimizzazione jaynesiana nella meccanica statistica. La necessità kripkiana a posteriori trova qui il suo correlato empirico più preciso: «la forma ottimale per la locomozione in un fluido incompressibile» è una proprietà determinata dalle leggi fisiche con la stessa forza con cui «acqua = H₂O» è determinata dalla struttura molecolare. In entrambi i casi, la scoperta è empirica; la necessità, una volta compresa, è strutturale.

7.8 Il realismo strutturale come posizione di compromesso nel continuum N

Una posizione nel dibattito sulla necessità nomologica che il saggio non ha ancora considerato è il *realismo strutturale* (Worrall 1989; Ladyman e Ross 2007). Di fronte al pessimismo meta-induttivo — l'argomento che, poiché le teorie del passato sono state ripetutamente sostituite, le teorie attuali probabilmente sono false — il realismo strutturale risponde che le teorie successive conservano sistematicamente la struttura matematica delle predecessori, anche quando cambiano le entità postulate. La meccanica ondulatoria di Fresnel è stata superata dalla teoria di Maxwell, ma le equazioni di Fresnel rimangono valide come caso limite. La continuità è strutturale, non ontologica.

In termini del continuum N: $N(\text{struttura_matematica}, \Gamma, \Sigma, \Delta) \rightarrow 1$ per Γ abbastanza grande (la struttura è stabile attraverso le revisioni teoriche), mentre $N(\text{entità_intrinseca}, \Gamma, \Sigma, \Delta) < 1$ sempre (la natura intrinseca degli oggetti rimane

contingente). Il realismo strutturale afferma dunque che la fisica conosce la struttura necessaria del mondo ma non il sostrato contingente che la realizza — posizione che corrisponde a un gradiente N asimmetrico tra livello strutturale e livello sostanziale.

Questo si connette direttamente alla convergenza evolutiva: ciò che converge nelle traiettorie evolutive indipendenti è la *struttura* (la forma fusiforme, la lente convergente, l'endotermia), non il *materiale* (osso o cartilagine, rodopsina o criptocromo). La necessità kripkiana a posteriori si applica alla struttura funzionale-fisica della soluzione ottimale, non al modo biologico contingente con cui essa è realizzata. Il realismo strutturale e il disposizionalismo di Bird descrivono, da angolazioni diverse, la stessa asimmetria: necessità della struttura astratta, contingenza del sostrato concreto.

7.5 Il collegamento con la fisica: vincoli e canalizzazione attraverso i domini

Il tema della canalizzazione — la tendenza dei sistemi complessi a convergere verso un insieme ristretto di stati privilegiati nonostante la loro libertà di principio di esplorare uno spazio molto più ampio — attraversa trasversalmente tutti i domini esaminati in questo saggio, e merita un'analisi unificante.

Nella biologia evolutiva, la canalizzazione di Waddington (Conrad Waddington, anni Quaranta) descriveva la tendenza dei percorsi di sviluppo embrionale a resistere alle perturbazioni e a mantenere la traiettoria verso uno stato finale definito (epigenetico landscape). La metafora era quella di una biglia che rotola in una valle: piccole perturbazioni non la fanno uscire dalla valle, ma la riportano verso il fondovalle. Waddington non aveva gli strumenti matematici per formalizzare questo intuito, ma esso anticipa precisamente la nozione di bacino di attrazione del paesaggio adattativo.

Nella fisica, la canalizzazione emerge nei sistemi con simmetrie: le leggi di conservazione (della energia, del momento, del momento angolare) derivano, per il teorema di Noether, dalle simmetrie del Lagrangiano del sistema, e vincolano le traiettorie possibili a sottospazi di dimensione inferiore dello spazio delle fasi. Un sistema con tutte e tre le simmetrie fondamentali (traslazione temporale, spaziale e rotazionale) ha tre quantità conservate che riducono di sei dimensioni lo spazio accessibile delle traiettorie.

Nella statistica, la canalizzazione corrisponde alla struttura delle dipendenze condizionali nel grafo causale: le variabili che hanno pochi predecessori nel grafo (pochi antenati causali) sono altamente determinate da quella struttura, mentre le variabili con molti predecessori hanno più gradi di libertà residua. La teoria grafica dei modelli probabilistici (graphical models di Lauritzen e Wermuth) formalizza questa struttura: la struttura del DAG canalizza le distribuzioni di probabilità verso la famiglia delle distribuzioni compatibili con le indipendenze condizionali codificate dal grafo.

Il collegamento tra questi tre tipi di canalizzazione — biologica, fisica, statistica — suggerisce che esista una struttura matematica comune che li sottende. In tutti i casi, la canalizzazione è prodotta da *vincoli strutturali* che agiscono sullo spazio dei possibili, riducendone la dimensione effettiva e creando attrattori verso cui le traiettorie dinamiche convergono. Questi vincoli non eliminano la contingenza — le traiettorie all'interno dei bacini di attrazione rimangono variabili — ma la circoscrivono: la

contingenza non è più la libertà di occupare un qualsiasi punto dello spazio, ma la libertà di muoversi all'interno dei corridoi definiti dai vincoli.

Questa nozione di *contingenza vincolata* — contingenza entro i limiti della struttura di canalizzazione — è forse la categoria più adeguata per descrivere la modalità con cui gli eventi si presentano nei sistemi naturali complessi. Essa non è la contingenza assoluta dell'ipercaos meillassouxiano, né la quasi-necessità deterministica della fisica classica laplaciana: è qualcosa di intermedio che ha una struttura propria e che richiede concetti propri per essere articolata.

7.6 La distinzione kripkiana consolidata: il terzo regime attraverso i domini

Il contributo di Saul Kripke in *Naming and Necessity* (le lezioni del 1970, pubblicate nel 1980) è stato introdotto strutturalmente già nel §1.5 come terzo regime modale. A questo punto del saggio, dopo aver attraversato la statistica, la biologia evolutiva e la meccanica quantistica, è possibile consolidarlo mostrando come esso si manifesti in ciascun dominio in modo preciso e non semplicemente analogico.

Il quadro modale kripkiano, già presentato, produce quattro regimi anziché due. Le proposizioni *necessarie a priori* sono quelle tradizionalmente accettate: le verità logiche e matematiche, le verità analitiche. Le proposizioni *contingenti a posteriori* sono le verità empiriche ordinarie. Ma Kripke mostra che esistono anche proposizioni *necessarie a posteriori* — verità che, sebbene scoperte empiricamente, sono vere in tutti i mondi possibili — e proposizioni *contingenti a priori* — verità che si conoscono indipendentemente dall'esperienza ma che non sono vere in tutti i mondi possibili.

Questa struttura kripkiana illumina aspetti del problema della contingenza che le posizioni leibniziana e meillassouxiana non catturano pienamente. Per Leibniz, la necessità è sempre a priori nella struttura: il predicato è contenuto nel soggetto, e la necessità è leggibile nell'analisi del concetto. Per Meillassoux, la contingenza è assoluta e non vi sono necessità genuine a livello degli oggetti. Kripke mostra che esiste un terzo regime: vi sono fatti su cui l'esperienza ci informa ma che, una volta noti, non potrebbero essere altrimenti. La necessità essenziale a posteriori non dipende dalla profondità dell'analisi concettuale (Leibniz) né è smentita dalla contingenza nomologica (Meillassoux): essa dipende dall'identità degli oggetti reali e dalla loro struttura fisica.

Nel dominio biologico, la necessità kripkiana a posteriori offre un modo per articolare la tesi di Conway Morris in termini più precisi. La proposizione «l'occhio a lente è una struttura ottica basata su una lente convergente e su cellule fotosensibili» è una necessità a posteriori nel senso di Kripke: scoperta empiricamente (attraverso l'analisi della struttura ottica e delle leggi fisiche dell'immagine), ma non modificabile una volta che si fissa la funzione di vedere immagini in un ambiente fisico governato dalle leggi dell'ottica geometrica. Non vi è un mondo in cui le leggi dell'ottica siano quelle del nostro mondo e l'occhio a lente funzioni diversamente nella sua struttura essenziale — una lente convergente che focalizza i raggi su una superficie fotorecettiva è l'unica architettura fisica capace di formare un'immagine, e questo è necessariamente vero date quelle leggi. La convergenza evolutiva è allora, in parte, il risultato dell'operare di necessità essenziali kripkiane nel dominio biologico: le strutture fisicamente efficienti per certi compiti sono necessariamente quelle che sono,

e la biologia le raggiunge indipendentemente dalla storia, non perché sia guidata da una forza teleologica ma perché non vi sono alternative fisicamente equivalenti.

Analogamente, la forma ottimale per la locomozione in un fluido incomprimibile — la forma fusiforme documentata da McGhee nei tonni, nei delfini e negli ittiosauri — è una necessità kripkiana a posteriori: scoperta dalle equazioni di Navier-Stokes applicata alla resistenza idrodinamica, ma non modificabile nel quadro di quelle leggi. Un biologo non saprebbe a priori che questa forma è ottimale senza conoscere la fluidodinamica; ma, una volta nota la fluidodinamica, la necessità della forma è strutturale.

Nel dominio della meccanica quantistica, la necessità kripkiana a posteriori illumina la natura degli stati puntatore della decoerenza (introdotti nel §6.7). La *pointer basis* — l'insieme degli stati quantistici che sopravvivono all'interazione con l'ambiente — non è determinata a priori dalla struttura matematica dello spazio di Hilbert, ma dipende dalla fisica concreta dell'interazione sistema-ambiente. Essa è scoperta *a posteriori* (attraverso l'analisi dell'hamiltoniana di interazione), ma, una volta identificata, è necessariamente quella: non vi è un mondo in cui lo stesso sistema soggetto alla stessa interazione ambientale abbia una *pointer basis* diversa, perché la *pointer basis* è determinata dalla struttura fisica dell'interazione, non dalle preferenze del fisico o dalle condizioni iniziali storiche. La *pointer basis* è, in questo senso, una proprietà essenziale del sistema-in-quel-contesto nel senso di Kripke.

Questa connessione ha una conseguenza rilevante per il problema della misura. L'interpretazione di Copenaghen — che tratta la funzione d'onda come uno strumento di calcolo senza riferimento a stati fisici reali — non può spiegare perché la decoerenza produca *sempre* la stessa *pointer basis* per lo stesso sistema-ambiente. La *pointer basis* è una struttura necessaria a posteriori, e questa necessità richiede una spiegazione ontica che il mero strumentalismo di Copenaghen non fornisce. L'*einselection* di Zurek è un'argomentazione implicita per una forma di necessità kripkiana a posteriori nel dominio quantistico: gli stati puntatore non sono arbitrari (non sono contingenti a posteriori), ma sono necessari dati i parametri fisici dell'interazione (necessari a posteriori).

Nel dominio statistico, la necessità kripkiana a posteriori corrisponde alle strutture causali reali che il modello DAG di Pearl intende identificare. Una relazione causale autentica — C causa E nel grafo causale del sistema — è scoperta a posteriori attraverso esperimenti controllati o analisi osservazionale sofisticata, ma, una volta identificata, è necessaria nel senso che non potrebbe non valere nel sistema che stiamo descrivendo: se il sistema fosse strutturalmente diverso, non sarebbe quello stesso sistema. Il calcolo $\text{do}(C)$ di Pearl — la distinzione tra $P(E \mid C)$ (condizionamento osservazionale) e $P(E \mid \text{do}(C))$ (effetto causale reale) — misura precisamente questa differenza tra contingenza apparente (l'associazione osservata, soggetta al paradosso di Simpson) e necessità strutturale (la relazione causale autentica, invariante rispetto agli interventi). Le relazioni causali reali sono necessità kripkiane a posteriori del sistema: scoperte empiricamente attraverso la manipolazione, ma una volta identificate, non modificabili senza cambiare il sistema stesso.

La struttura formale unificante può essere espressa come segue. Per ogni sistema S — fisico, biologico, statistico — la necessità kripkiana a posteriori corrisponde a una proprietà P^* tale che:

- (a) P^* non è conoscibile a priori: richiede indagine empirica per > essere identificata (non è analitica rispetto al concetto del > sistema)
- (b) P^* è necessaria a posteriori: una volta identificata, vale in tutti > i mondi possibili in cui S esiste con la sua struttura essenziale
- (c) P^* è indipendente dai parametri del continuum N: non dipende da Γ > (profondità dell'analisi), Σ (scala di osservazione), o Δ > (contesto di condizionamento) — essa vale ovunque ci si collochi > lungo queste dimensioni, purché il sistema rimanga quello che è

Questa struttura formale chiarisce perché la necessità kripkiana a posteriori costituisce un regime distinto dagli altri cinque tipi di necessità identificati nel saggio: essa non è epistemica nel senso leibniziano (non emerge dall'analisi del concetto), non è meta-nomologica nel senso meillassouxiano (non riguarda le leggi come tali), non è statistica nel senso del condizionamento, non è emergente per aggregazione, non è nomologica nel senso quantistico. È essenziale nel senso preciso che Kripke le attribuisce: una proprietà dell'oggetto in quanto tale, indipendente da come lo si descrive o lo si analizza.

7.7 I rimandi trasversali: una mappa delle connessioni

I capitoli precedenti hanno trattato i quattro domini — metafisica leibniziana, speculazione meillassouxiana, statistica, biologia evolutiva — in relativa separazione, salvo le connessioni tracciate nel Capitolo V. Vale la pena ora raccogliere sistematicamente i rimandi trasversali che attraversano l'intera struttura del saggio.

Il primo rimando connette il problema leibniziano dell'analisi infinita con il paradosso di Simpson in statistica. In entrambi i casi, la contingenza o necessità apparente di un'associazione (tra predicati, nel caso leibniziano; tra variabili, nel caso statistico) dipende dalla profondità dell'analisi condotta — quanti passaggi analitici o quante variabili di controllo si sono considerate. L'aggiunta di una nuova variabile di controllo in un'analisi statistica è formalmente analoga all'aggiunta di un nuovo passaggio nell'analisi leibniziana di un concetto: in entrambi i casi, ciò che appare contingente a un livello di analisi può rivelarsi necessario (o il contrario) al livello successivo.

Il secondo rimando connette l'ipercaos meillassouxiano con la contingenza stocastica a scala microscopica della meccanica statistica e della biologia molecolare. L'ipercaos non è, strutturalmente, diverso dalla contingenza delle collisioni molecolari o delle mutazioni genetiche: in entrambi i casi, si tratta di processi senza ragione sufficiente a scala locale. La differenza è che Meillassoux vuole estendere questa contingenza anche alle leggi stesse, mentre la fisica e la biologia trattano le leggi come necessarie e soltanto i fenomeni come stocastici.

Il terzo rimando connette la convergenza evolutiva di Conway Morris con la decoerenza quantistica: in entrambi i casi, la molteplicità dei possibili (la sovrapposizione di stati quantistici, la varietà delle traiettorie evolutive possibili) viene soppressa da interazioni con l'ambiente, e l'esito si restringe a un insieme molto più piccolo di stati quasi-classici (stati puntatori, morfologie convergenti). La canalizzazione è il meccanismo comune.

Il quarto rimando connette la necessità kripkiana a posteriori con il modello di Ornstein-Uhlenbeck in biologia evolutiva: i designatori rigidi di Kripke corrispondono, nel linguaggio biologico, agli attrattori stabili del paesaggio adattativo. Una struttura

biologica è «necessaria a posteriori» nel senso che, una volta scoperta empiricamente la sua efficienza fisica, non vi sono alternative comparabili; questo corrisponde, matematicamente, alla presenza di un minimo globale profondo nella funzione di fitness, verso cui il processo di Ornstein-Uhlenbeck converge con probabilità prossima a 1.

Questi rimandi non sono analogie superficiali: essi rivelano una struttura matematica comune — la riduzione della libertà di uno spazio di stati sotto l'azione di vincoli di diversa origine (logica, fisica, statistica, biologica) — che attraversa tutti i domini e che costituisce, forse, il contenuto più genuino della nozione di necessità.

Il *quinto rimando* — il più nuovo rispetto all'impostazione originale del saggio — connette la necessità kripkiana a posteriori con tre manifestazioni empiriche precise nei tre domini scientifici: l'essenza morfologica delle strutture convergenti (biologia, la forma ottimale per la locomozione in un fluido), la *pointer basis* dell'interazione sistema-ambiente (fisica quantistica, la base degli stati classici selezionati dalla decoerenza), e le relazioni causali autentiche nel modello DAG di Pearl (statistica, la distinzione tra associazione osservazionale ed effetto causale reale). In tutti e tre i casi, una proprietà è scoperta empiricamente — non è analitica rispetto al concetto del sistema — ma, una volta identificata, si rivela necessaria con una forza che né l'analisi leibniziana né la critica meillassouxiana riescono a catturare. La struttura formale comune (§7.6) è la proprietà P^* che soddisfa le condizioni (a), (b), (c): empirica nell'accesso, necessaria nella struttura, indipendente dai parametri del continuum N .

La mappa dei cinque rimandi rivela così una rete di connessioni che non era visibile prima di attraversare sistematicamente i cinque domini. Il dibattito Gould–Conway Morris sull'evoluzione e il programma MaxEnt di Jaynes non sono soltanto analogie: condividono la struttura formale di un problema di ottimizzazione (quarto rimando). La decoerenza di Zurek e la convergenza di Conway Morris non sono soltanto metafore l'una dell'altra: condividono l'operatore E_{sel} di selezione ambientale degli stati privilegiati (terzo rimando). E la necessità kripkiana a posteriori non è soltanto un contributo della filosofia del linguaggio al dibattito modale: è una struttura che si realizza concretamente — in forme diverse ma formalmente isomorfe — nella biologia, nella fisica quantistica e nella statistica causale (quinto rimando).

Capitolo VIII

La matematica della contingenza: incompletezza, casualità algoritmica e i limiti della formalizzazione

Il saggio utilizza la matematica — teoria degli insiemi, probabilità, processi stocastici — come linguaggio neutro per articolare il problema della contingenza attraverso i domini. Questa scelta è giustificata dal suo potere di precisione, ma produce una tensione che il saggio non tematizza: la matematica stessa è necessaria o contingente? E se è contingente — come sembra implicare il principio di fatticità di Meillassoux, che afferma che nulla è necessario — allora gli strumenti matematici che il saggio usa per articolare la contingenza sono essi stessi contingenti, il che mette in questione la solidità dell'intera struttura.

I teoremi di incompletezza di Gödel (1931) offrono un'analisi di questa tensione che è di una precisione e di una profondità tali da meritare un trattamento autonomo. Essi mostrano che la necessità in matematica ha una struttura stratificata — analoga alla struttura stratificata della contingenza che il saggio traccia negli altri domini — e che questa stratificazione è essa stessa formalmente dimostrabile.

8.1 Il primo teorema di incompletezza e la contingenza aritmetica

Il primo teorema di incompletezza di Gödel afferma che in ogni sistema formale S che soddisfa le seguenti condizioni: (a) è consistente (non dimostra contraddizioni), (b) è sufficientemente espressivo da contenere l'aritmetica elementare, (c) è ricorsivamente assiomatizzabile (esiste un algoritmo per decidere se un dato enunciato è un assioma), esiste un enunciato G_S tale che:

$$S \not\vdash G_S \text{ e } S \not\vdash \neg G_S$$

ovvero G_S è indecidibile in S : né G_S né la sua negazione sono dimostrabili a partire dagli assiomi di S . L'enunciato G_S è costruito da Gödel attraverso la diagonalizzazione: esso afferma, in modo autoriferito, la propria indimostrabilità in S . Se fosse dimostrabile, S dimostrerebbe una falsità (poiché G_S afferma di essere indimostrabile, e se lo si dimostrasse sarebbe falso). Quindi, se S è consistente, G_S è indimostrabile — ma anche vero, nell'interpretazione standard dell'aritmetica.

La rilevanza di questo risultato per il problema della contingenza è immediata. G_S è un enunciato aritmetico vero ma non dimostrabile all'interno di S . Nel linguaggio della distinzione leibniziana, G_S è una verità la cui ragione sufficiente non è accessibile all'interno del sistema formale dato: la sua «analisi» (la sua derivazione dagli assiomi) richiede di uscire dal sistema, di passare a un sistema più ricco S' che include nuovi assiomi (tipicamente, la coerenza di S , espressa come un assioma di S'). Ma allora $G_{\{S'\}}$ è indimostrabile in S' , e per dimostrarlo bisogna passare a S'' , e così via, in una gerarchia infinita.

Questa gerarchia di Gödel è formalmente analoga alla gerarchia di profondità dell'analisi leibniziana. Per Leibniz, ogni verità contingente richiede, per la sua dimostrazione completa, un numero infinito di passi analitici; per Gödel, ogni sistema formale lascia alcune verità aritmetiche indimostrabili, e la loro dimostrazione richiede un sistema più forte, che a sua volta lascia alcune verità indimostrabili, e così via. In entrambi i casi, vi è una struttura infinita di livelli che non può essere esaurita da nessun sistema finito. Il parametro Γ del continuum N — la profondità dell'analisi — ha una realizzazione matematica precisa nella gerarchia gödeliana.

8.2 Il secondo teorema e la coerenza come contingenza

Il secondo teorema di incompletezza ha conseguenze ancora più radicali. Esso afferma che se S è un sistema formale consistente e sufficientemente espressivo, allora S non può dimostrare la propria coerenza:

$$S \not\vdash \text{Con}(S)$$

dove $\text{Con}(S)$ è l'enunciato aritmetico che afferma la coerenza di S (formalmente: «non esiste una dimostrazione di $0 = 1$ in S »). Questo significa che non è possibile,

dall'interno di S, garantire che S non produca contraddizioni. La coerenza di S è, rispetto a S stesso, un assunto contingente: non è dimostrabile, soltanto assumibile.

Questo risultato introduce una forma di contingenza nella matematica stessa che è distinta sia dalla contingenza logica (la coerenza di S non è assunta come contingente rispetto alla logica — la sua negazione non è una contraddizione logica) sia dalla contingenza empirica (la coerenza di S non è verificata per osservazione). È una contingenza formale: la coerenza del sistema è un presupposto che non può essere fondato all'interno del sistema stesso. Ogni matematica richiede, come punto di partenza, l'assunzione — non dimostrabile — della propria coerenza.

La connessione con Meillassoux è ironica. Meillassoux usa la matematica — e in particolare il teorema di Cantor — come strumento privilegiato di accesso all'assoluto: la matematica è il linguaggio che articola meglio la struttura della contingenza perché pensa la struttura dei possibili con la massima precisione. Ma se la matematica stessa ha una struttura gödeliana — se i suoi fondamenti sono contingenti nel senso del secondo teorema — allora l'argomento meillassouxiano basato sul teorema di Cantor si trova nella posizione paradossale di usare uno strumento la cui validità non può essere garantita all'interno dello stesso sistema che lo usa. Meillassoux deve assumere la coerenza dell'assiomatica cantoriana — e questa assunzione è, per il secondo teorema, una assunzione che non può essere fondata a partire da quella stessa assiomatica.

8.3 Il teorema di Chaitin e la casualità aritmetica

Gregory Chaitin ha mostrato, a partire dagli anni Settanta, che la incompletezza gödeliana non riguarda soltanto enunciati artificiosamente costruiti per autodiagonalizzazione (come G_S), ma pervade l'aritmetica in modo molto più profondo: esistono enunciati aritmetici veri che sono veri «per caso» — nel senso che la loro verità non può essere derivata da nessun sistema assiomatico finito, non perché richiedano un sistema più forte, ma perché la loro verità è, in un senso preciso, casuale. Il risultato principale di Chaitin riguarda la costante Ω (Omega), definita come la probabilità che una macchina di Turing universale U si fermi su un input scelto casualmente:

$$\Omega = \sum \{p : U(p) \text{ si ferma}\} 2^{-|p|}$$

Ω è un numero reale tra 0 e 1, la cui espansione binaria $\omega_1\omega_2\omega_3\dots$ è una sequenza di 0 e 1 tale che ogni bit ω è un enunciato matematico indipendente: sapere i valori di $\omega_1, \dots, \omega$ non aiuta a predire il valore di ω_{+1} per nessuna sequenza finita di assiomi. I bit di Ω sono «massimalmente casuali» nel senso della complessità algoritmica: non vi è nessun pattern, nessuna struttura, nessuna ragione per cui siano 0 o 1.

Chaitin interpreta questo risultato come la dimostrazione che l'aritmetica contiene un irriducibile elemento di casualità: non soltanto ci sono verità indimostrabili (Gödel), ma ci sono verità la cui verità è casuale nel senso più radicale. Nella terminologia del saggio, i bit di Ω sono enunciati con $N = 0$ nel senso del grado di necessità algoritmica: non vi è nessuna struttura che li generi, nessun programma più corto di loro stessi, nessuna ragione sufficiente. Sono, nel senso più preciso, contingenti.

La connessione con Leibniz è diretta: i bit di Ω sono le verità aritmetiche la cui analisi richiederebbe infiniti passi leibniziani. La connessione con Meillassoux è più complessa: Meillassoux afferma che la contingenza è la struttura dell'assoluto, ma usa

la matematica come strumento per articolare questa struttura, assumendo implicitamente che la matematica stessa sia necessaria. Il teorema di Chaitin mostra che la matematica contiene al suo interno un nucleo di contingenza irriducibile — i bit di Ω — che nessun sistema assiomatico può catturare. Se la matematica è contingente in questo senso, allora anche il principio di fatticità, che si esprime matematicamente, è soggetto a questa contingenza. Il progetto meillassouxiano di usare la matematica per pensare l'assoluto della contingenza si trova a utilizzare uno strumento che è esso stesso pervaso di contingenza irriducibile.

8.4 La gerarchia gödeliana e il continuum N

I risultati di Gödel e Chaitin si integrano nel continuum $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ in modo preciso e inatteso. Il parametro Γ — la profondità dell'analisi — ha una realizzazione matematica nella gerarchia dei sistemi formali: $Z \subset ZF \subset ZFC \subset ZFC+LC \subset \dots$ (dove LC indica grandi cardinali di forza crescente). Ogni sistema formale più forte dimostra più enunciati del predecessore, ma lascia comunque enunciati indimostrabili. Il gradiente N nella gerarchia gödeliana è:

$N(G_S, \Gamma_S) = 0$ per $\Gamma = S$ (sistema di base)

$N(G_S, \Gamma_{\{S'\}}) = 1$ per $\Gamma = S'$ (sistema più forte che contiene $Con(S)$)

Il grado di necessità di G_S dipende quindi dalla profondità dell'analisi Γ : un enunciato che è indimostrabile (contingente, $N = 0$) in un sistema diventa dimostrabile (necessario, $N = 1$) nel sistema più forte. La distinzione leibniziana tra necessario e contingente è, in questa prospettiva, relativa al sistema formale di riferimento — esattamente come il saggio afferma che sia relativa alla profondità dell'analisi. La gerarchia gödeliana è la realizzazione matematica del parametro Γ del continuum N.

La condizione (iv) del continuum N — $\lim_{\Gamma \rightarrow \infty} N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta) = 1$ per Leibniz — trova qui la sua verifica e il suo limite. Nella gerarchia gödeliana, ogni enunciato aritmetico è dimostrabile in qualche sistema abbastanza forte: la gerarchia transfinita dei sistemi formali, se esaurita, risolve ogni questione aritmetica. In questo senso, il limite leibniziano $N = 1$ è raggiungibile per ogni enunciato, ma soltanto attraverso una gerarchia potenzialmente infinita di sistemi formali. La posizione leibniziana — che un'analisi infinitamente approfondita riveli la necessità di ogni fatto — trova un correlato preciso nella struttura gödeliana: ogni verità aritmetica è dimostrabile in un sistema sufficientemente forte, ma nessun sistema singolo è sufficiente per tutte.

La posizione meillassouxiana — $\lim_{\Gamma \rightarrow \infty} N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta) < 1$ per ogni enunciato empirico — trova invece un correlato nei bit di Ω di Chaitin: enunciati la cui verità è casuale nel senso più radicale, e che nessuna gerarchia di sistemi formali può derivare senza includerli esplicitamente come assiomi. Per questi enunciati, il limite del gradiente N non converge a 1; rimane all'interno di un intervallo che riflette l'irriducibile casualità della struttura aritmetica. Il disaccordo tra Leibniz e Meillassoux si ripresenta, in forma matematicamente precisa, come il disaccordo tra la convergenza completa della gerarchia gödeliana e l'irriducibilità dei bit di Ω di Chaitin.

Conclusione

La distinzione al limite di se stessa

La mappa del percorso e ciò che essa non mostra

Chi attraversa un territorio guidato da una mappa rischia di confondere la mappa con il territorio. Questo saggio ha costruito una mappa — il continuum $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ — e ha percorso il territorio della distinzione tra necessario e contingente attraverso quattro domini. È opportuno, in chiusura, riconoscere sia ciò che la mappa ha mostrato sia ciò che essa necessariamente nasconde.

La mappa ha mostrato che la distinzione tra contingente e necessario non è una frontiera ma un gradiente. Che Leibniz, Meillassoux, la statistica e la biologia evolutiva non siano quattro approcci a quattro problemi separati ma quattro posture diverse rispetto a un medesimo asse di tensione: la tensione tra la determinatezza dell'essere e la capacità di qualsiasi mente finita di coglierla, tra la struttura del reale e gli strumenti con cui la si interroga. Che la contingenza non sia un attributo intrinseco dei fatti ma una relazione tra i fatti e il contesto della loro analisi. E che questa relazionalità non sia una debolezza epistemica da superare — il limite provvisorio di una scienza in progresso — ma una struttura permanente, connaturata all'atto stesso di conoscere.

Ma la mappa non mostra tutto. In particolare, essa non mostra — e non può mostrare — se al fondo dell'essere vi sia o meno un'ultima necessità che tutto sorregge e che una mente perfetta potrebbe scorgere. Questa domanda — la domanda di Leibniz — rimane aperta, non perché manchino argomenti ma perché ogni argomento che la affronta utilizza strumenti epistemici finiti per rispondere a una questione che li travalica strutturalmente. Non è possibile rispondere alla domanda «vi è una ragione sufficiente per cui tutto è come è?» senza già presupporre, in qualche misura, che vi sia o non vi sia una tale ragione. La risposta è, in questo senso, necessariamente circolare — e questa circolarità è essa stessa, forse, la cosa più necessaria e più contingente che si possa incontrare.

Il capovolgimento meillassouxiano e il suo prezzo

La mossa di Meillassoux è intellettualmente coraggiosa e filosoficamente stimolante, ma il suo prezzo è più alto di quanto l'autore riconosca esplicitamente. Trasformare la contingenza in una necessità di secondo ordine — affermare che è necessariamente vero che tutto è contingente — non elimina la struttura modale della necessità ma la sposta. Il principio di fatticità è, nella misura in cui è vero, necessariamente vero. Ma allora esso stesso è un'eccezione alla tesi generale della contingenza di tutto, il che crea una tensione interna che l'argomentazione non risolve interamente.

Vi è di più. Meillassoux ha bisogno, per il suo argomento contro la probabilità dell'ipercaos, che l'insieme di tutti i possibili stati nomologici dell'universo non sia totalizzabile — che sia una classe propria piuttosto che un insieme. Questo lo porta a fare affidamento sulla teoria degli insiemi di Cantor come strumento metafisico privilegiato. Ma la teoria degli insiemi è essa stessa una costruzione storica, soggetta a revisione, stratificata in assiomatizzazioni diverse (ZF, ZFC, ZF con l'assioma della

scelta a grandi cardinali). Quale sistema assiomatico è quello che descrive la struttura reale dei possibili? E questo sistema assiomatico è necessario o contingente?

Se è contingente, allora il fondamento dell'argomento di Meillassoux è esso stesso contingente — e l'intero edificio potrebbe collassare se la matematica fosse strutturata diversamente. Se è necessario, allora esiste una necessità che precede e fonda la contingenza — esattamente il genere di necessità che Meillassoux intende escludere. Questa tensione non invalida il progetto meillassouxiano, ma lo situa in una difficoltà genuina che testimonia quanto la distinzione tra necessario e contingente, anche quando la si vuole dissolvere, tenda a riprodursi.

Infine, la necessità essenziale kripkiana a posteriori costituisce un ostacolo che la strategia di Meillassoux non riesce ad aggirare del tutto. Anche se le leggi fisiche fossero contingenti nel senso meillassouxiano — capaci di cambiare da un momento all'altro senza ragione — ciò non toccherebbe la tesi che *questo* campione di acqua, identificato in questo mondo, sia essenzialmente composto da H_2O . La necessità essenziale non dipende dalla stabilità delle leggi ma dall'identità degli oggetti: un mondo in cui le leggi cambino arbitrariamente può comunque contenere oggetti con proprietà essenziali che rimangono necessarie nella misura in cui quegli oggetti esistono. Il dominio della necessità kripkiana — l'identità degli oggetti, le loro proprietà essenziali, le loro strutture fondamentali — è un dominio che precede le leggi e non dipende dalla loro contingenza o necessità. Meillassoux ha costruito la sua critica contro la necessità nomologica (il PSR applicato alle leggi della natura) e contro la necessità logica (le verità analitiche a priori); ma non ha costruito una critica efficace contro la necessità ontologica degli oggetti, che Kripke ha mostrato operare in un regime distinto da entrambe.

La convergenza evolutiva come metafora epistemologica

C'è qualcosa di paradossalmente appropriato nel fatto che la biologia evolutiva abbia fornito, nel dibattito tra Gould e Conway Morris, una metafora per l'epistemologia della distinzione stessa. La convergenza evolutiva mostra che, in un sistema complesso, traiettorie radicalmente diverse — diverse per punto di partenza, per storia, per contingenze subite — possono convergere verso le stesse soluzioni strutturali. Il motivo è che lo spazio delle soluzioni biologicamente efficienti non è uniforme: esso ha una topologia con picchi profondi e bacini di attrazione ampi, verso cui le traiettorie vengono inevitabilmente convogliate.

Se la distinzione tra necessario e contingente ha subito qualcosa di analogo — se diverse tradizioni filosofiche, diversi programmi scientifici, diverse formalizzazioni matematiche convergono verso la medesima tensione irrisolvibile — allora forse questa convergenza non è un incidente. Forse la tensione stessa è uno di quei picchi del paesaggio concettuale verso cui ogni analisi seria del rapporto tra mente e realtà è destinata a convergere, indipendentemente dal punto da cui prende avvio.

Leibniz parte dalla logica e arriva alla contingenza come limite dell'analisi. Meillassoux parte dalla fenomenologia post-kantiana e arriva alla contingenza come struttura dell'assoluto. La statistica parte dalla misurazione e arriva alla contingenza come gradiente dell'associazione. La biologia evoluzionistica parte dall'evidenza fossile e arriva alla contingenza come struttura del processo adattativo. Quattro traiettorie diverse; lo stesso picco.

La distinzione come struttura produttiva

Una distinzione che si rivela non binaria ma graduata non è per questo una distinzione da abbandonare. Al contrario: è spesso proprio le distinzioni che sembrano dissolversi nell'analisi ravvicinata quelle che si rivelano più produttive. La distinzione tra analitico e sintetico, che Kant pensava nitida e Quine ha mostrato essere indeterminata ai bordi, non è diventata meno utile dopo la critica di Quine: è diventata più sfumata e più potente come strumento d'analisi. La distinzione tra osservazione e teoria, che il positivismo logico credeva assoluta e la post-positivismo ha riformulato come una differenza di grado, ha continuato a strutturare il dibattito metodologico in modo fecondo.

La distinzione tra contingente e necessario può sopravvivere alla scoperta della propria gradualità. Anzi, la sua sopravvivenza è garantita proprio da questa gradualità: se fosse una distinzione binaria, la scoperta di casi intermedi la renderebbe inapplicabile; poiché è un gradiente, i casi intermedi non la confutano ma la arricchiscono. Un fatto con $N = 0.3$ non è né pienamente contingente né pienamente necessario: è contingente in certi contesti e quasi-necessario in altri, e questa struttura contestuale è precisamente l'oggetto che un'epistemologia matura deve saper descrivere.

Ciò che rimane aperto

Tre domande rimangono aperte al termine di questo percorso, e la loro apertura non è un difetto dell'analisi ma la sua conclusione naturale.

La prima riguarda il fondamento del gradiente. Il continuum $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ dipende da tre parametri — profondità dell'analisi, scala di osservazione, contesto di condizionamento. Ma questi parametri sono a loro volta contingenti o necessari? La risposta che sembra imporsi è che essi siano contingenti rispetto a una scelta pragmatica (la scelta del problema e del metodo), ma necessari rispetto alla struttura dell'indagine razionale come tale. Una terza via che Kant aveva già percorso, senza risolverla, nella distinzione tra condizioni della conoscenza e struttura dell'oggetto conosciuto.

La seconda domanda riguarda il rapporto tra la contingenza e il tempo. In tutti e tre i domini non metafisici, la contingenza si è rivelata sensibile alla scala temporale: ciò che è contingente nel breve periodo tende a diventare quasi-necessario nel lungo periodo (termodinamica, convergenza evolutiva), oppure ciò che appare necessario nel lungo periodo rivela la sua contingenza nelle fluttuazioni del breve (fisica quantistica, derivate genetiche). Il tempo è un parametro privilegiato di Σ , e la domanda se la necessità cresca o diminuisca con il tempo è una domanda che la cosmologia e la termodinamica pongono senza rispondervi definitivamente.

La terza domanda è la più radicale, e riporta al punto di partenza. Leibniz aveva sostenuto che Dio ha scelto questo mondo tra infiniti mondi possibili in virtù del principio di perfezione. Meillassoux ha sostenuto che non vi è alcuna ragione per cui questo mondo sia questo e non altro. Conway Morris ha mostrato che certe strutture si sarebbero evolute comunque. La statistica ha mostrato che l'associazione dipende dal contesto. Ma nessuno di questi argomenti risponde alla domanda che Leibniz poneva nella sua forma più acuta: *perché esiste qualcosa piuttosto che nulla?*

Questa domanda — la domanda fondamentale della metafisica secondo Leibniz, ripresa da Heidegger con altra tonalità — è la domanda in cui la distinzione tra

necessario e contingente raggiunge il proprio limite assoluto. Qualunque risposta si dia, essa o presuppone una necessità (vi è qualcosa perché è necessario che vi sia qualcosa — ma perché è necessario?) oppure presuppone una contingenza (vi è qualcosa per puro caso — ma allora l'esistenza del caso stesso richiede una spiegazione). La domanda si morde la coda.

Forse l'unica cosa da dire è che questa domanda non è risolvibile ma è inesauribile — che essa produce pensiero senza produrre risposta, e che questa produttività senza conclusione è, a modo suo, sia necessaria che contingente: necessaria per la struttura dell'indagine razionale, contingente per la posizione che ciascuna mente finita occupa nell'universo che tenta di comprendere.

Appendice A — Logica modale e la semantica dei mondi possibili

A.1 I sistemi modali di base

La logica modale estende la logica proposizionale classica con due operatori primitivi:

$\Box$ (necessità) e $\Diamond$ (possibilità), legati dalla dualità:

$$\Box P \equiv \neg \Diamond \neg P$$

$$\Diamond P \equiv \neg \Box \neg P$$

La semantica di Kripke (semantica relazionale) interpreta queste formule su strutture del tipo $M = (W, R, V)$ dove:

W := insieme dei mondi possibili (non vuoto)

$R \subseteq W \times W$:= relazione di accessibilità tra mondi

$V : \text{Var} \rightarrow \mathcal{P}(W)$:= funzione di valutazione (assegna a ogni variabile proposizionale l'insieme dei mondi in cui è vera)

La verità di una formula modale in un mondo $w \in W$ è definita ricorsivamente:

$$M, w \models P \Leftrightarrow w \in V(P)$$

$$M, w \models \neg \varphi \Leftrightarrow M, w \not\models \varphi$$

$$M, w \models \varphi \wedge \psi \Leftrightarrow M, w \models \varphi \text{ e } M, w \models \psi$$

$$M, w \models \Box \varphi \Leftrightarrow \forall v \in W : wRv \rightarrow M, v \models \varphi$$

$$M, w \models \Diamond \varphi \Leftrightarrow \exists v \in W : wRv \wedge M, v \models \varphi$$

La necessità di φ in w significa che φ è vera in *tutti* i mondi accessibili da w ; la possibilità di φ in w significa che φ è vera in *almeno uno* dei mondi accessibili da w .

A.2 I sistemi K, T, S4, S5 e le loro proprietà

I principali sistemi della logica modale normale si ottengono aggiungendo assiomi che corrispondono a proprietà strutturali della relazione di accessibilità R .

Sistema K (minimo): Assioma K: $\Box(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow (\Box\varphi \rightarrow \Box\psi)$ Regola di necessitazione:

Se $\vdash \varphi$, allora $\vdash \Box\varphi$

Non si impone alcun vincolo su R .

Sistema T (riflessivo): K + Assioma T: $\Box\varphi \rightarrow \varphi$ R è riflessiva: $\forall w : wRw$

Questo assioma afferma che ciò che è necessario è anche vero nel mondo attuale — una proprietà di minima coerenza.

Sistema S4 (riflessivo e transitivo): $T +$ Assioma 4: $\Box\varphi \rightarrow \Box\Box\varphi$ R è riflessiva e transitiva: se wRv e vRu allora wRu

Questo assioma afferma che se φ è necessariamente vera, allora è necessariamente necessariamente vera.

Sistema S5 (equivalenza): $S4 +$ Assioma 5: $\Diamond\varphi \rightarrow \Box\Diamond\varphi$ R è una relazione di equivalenza (riflessiva, simmetrica, transitiva)

In S5, ogni mondo è accessibile da ogni altro (a meno di partizioni). Questo è il sistema in cui la struttura dei mondi possibili è più semplice: tutti i mondi si «vedono» a vicenda, e non vi è asimmetria nell'accessibilità.

A.3 La struttura modale leibniziana

La metafisica leibniziana si colloca naturalmente nel sistema S5 con una modifica importante. Leibniz distingue tra mondi possibili (che non si contraddicono internamente) e mondi compossibili (insiemi di individui possibili che possono coesistere senza contraddizione). Questa struttura di compossibilità non è quella standard di S5, perché in S5 ogni mondo è accessibile da ogni altro, mentre per Leibniz i mondi non sono tutti accessibili allo stesso modo: il mondo attuale è quello scelto da Dio, e la necessità ipotetica vincola ciò che è necessario *dato il mondo attuale*.

Una formalizzazione più precisa è quella di un sistema modale con due operatori di necessità:

$\Box_L \varphi$:= " φ è logicamente necessario" (vero in tutti i mondi possibili)

$\Box_H \varphi$:= " φ è ipoteticamente necessario" (vero in tutti i mondi compatibili con la decisione creativa di Dio)

con le relazioni di inclusione:

$\Box_L \varphi \rightarrow \Box_H \varphi \rightarrow \varphi$

e la contingenza corrispondente ai diversi livelli:

Contingenza assoluta: $\Diamond_L \varphi \wedge \Diamond_L \neg\varphi$ (φ è vera in alcuni ma non tutti i mondi)

Contingenza ipotetica: $\Diamond_H \varphi \wedge \Diamond_H \neg\varphi$ (φ avrebbe potuto essere falsa in un altro mondo che Dio avrebbe potuto creare)

Necessità ipotetica: $\Box_H \varphi$ (φ è vera in tutti i mondi compatibili con la creazione attuale)

A.4 La logica della fatticità meillassouxiana

Il principio di fatticità di Meillassoux può essere formalizzato in logica modale come:

PF: $\Box_M (\forall x \Diamond_M (x \text{ non è come } \bar{x}))$

dove $\Box_M$ e $\Diamond_M$ sono gli operatori modali del sistema di Meillassoux. Ma il problema è scegliere quale sistema modale sia appropriato. In S5, il PF implicherebbe:

$\Box_M P \rightarrow \Box_M \Box_M P$ (ciò che è necessario è necessariamente necessario)

Applicato al PF stesso: $\Box_M PF \rightarrow \Box_M \Box_M PF$

Poiché PF afferma la contingenza di ogni cosa, e PF è a sua volta necessario ($\Box_M PF$), si ottiene che PF è necessariamente necessario. Ma questo sembra contraddire il contenuto di PF, che afferma che nulla è necessario.

La risposta meillassouxiana è che PF non afferma che nulla ha proprietà di secondo ordine necessarie; afferma che ogni *ente di primo ordine* (ogni legge, ogni fatto) è contingente. La necessità del PF è una necessità di secondo ordine — sul tipo di struttura che l'essere deve avere — che non è un «ente di primo ordine» e dunque non ricade sotto la portata della quantificazione in PF.

Questa risposta è plausibile ma richiede una logica modale con distinzioni di tipo, ossia una logica modale di ordine superiore in cui la quantificazione su entità di primo ordine è distinta dalla quantificazione su proprietà e meta-proprietà. La formalizzazione esatta di questo sistema non è sviluppata da Meillassoux stesso e rimane un problema aperto nella letteratura secondaria.

A.5 La necessità kripkiana a posteriori: struttura formale

Per formalizzare la necessità a posteriori di Kripke nel sistema di mondi possibili, introduciamo l'operatore di designazione rigida.

Sia $d : \text{Termini} \times W \rightarrow \text{Oggetti} \cup \{\emptyset\}$ una funzione che associa a ogni termine singolare t e a ogni mondo possibile w l'oggetto a cui t si riferisce in w (o $\emptyset$ se t non si riferisce a nulla in w). Un termine singolare t è un *designatore rigido* se:

$$\forall w, w' \in W : d(t, w) \neq \emptyset \wedge d(t, w') \neq \emptyset \rightarrow d(t, w) = d(t, w')$$

cioè t designa lo stesso oggetto in tutti i mondi in cui designa qualcosa.

Per un designatore rigido t che designa l'oggetto o , e per una proprietà essenziale P di o (una proprietà tale che o non potrebbe esistere senza P), la necessità kripkiana a posteriori si formalizza come:

$$\Box(\forall w : d(t, w) \neq \emptyset \rightarrow P(d(t, w)))$$

cioè: in tutti i mondi accessibili in cui t si riferisce a qualcosa, quel qualcosa ha la proprietà P . Questo è necessariamente vero ($\Box$) ma conoscibile solo a posteriori ($A = 0$ per questa proposizione).

Nella tavola 2×2 delle modalità:

$$N_{\text{Kripke}}(P(t)) = 1 \text{ (necessità metafisica: } \Box P(t))$$

$$A_{\text{Kripke}}(P(t)) = 0 \text{ (non conoscibile a priori)}$$

dove N è il valore di necessità e A è il valore di apriorità. Questo regime occupa la cella in alto a destra, quella delle necessità a posteriori, ed è ortogonale all'asse leibniziano (che identifica N e A) e all'asse meillassouxiano (che nega N per qualsiasi fatto di primo ordine).

Nel continuum $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$, la condizione kripkiana (v) del §5.2 e §5.6 ha la forma:

$$N(P(t), \Gamma, \Sigma, \Delta) = 1 \text{ per qualsiasi } \Gamma, \Sigma, \Delta, \text{ purché } t \text{ sia un designatore rigido e } P \text{ sia essenziale all'oggetto a cui } t \text{ si riferisce.}$$

Questa condizione è indipendente dai parametri del continuum non perché la necessità sia «più forte» della necessità leibniziana o della necessità meillassouxiana, ma perché opera su un asse diverso: non dipende dalla profondità dell'analisi (Γ), dalla scala di osservazione (Σ), o dal contesto di condizionamento (Δ), ma dall'identità dell'oggetto e dalla struttura della sua essenza.

Appendice B — Derivazione completa della distribuzione χ^2 e delle misure di associazione

B.1 La distribuzione multinomiale e la sua approssimazione normale

Consideriamo $r \times c$ variabili casuali N_{ij} che rappresentano le frequenze nelle celle di una tavola di contingenza $r \times c$. Sotto il modello di campionamento multinomiale con n osservazioni totali, il vettore $(N_{11}, N_{12}, \dots, N_{rc})$ segue una distribuzione multinomiale:

$$P(N_{11} = n_{11}, \dots, N_{rc} = n_{rc}) = n! / (\prod_i \prod_j n_{ij}!) \cdot \prod_i \prod_j p_{ij}^{n_{ij}}$$

dove $p_{ij} = P(X = x_i, Y = y_j)$ sono le probabilità congiunte vere. Sotto H_0 di indipendenza:

$$p_{ij}^0 = p_{i\bullet} \cdot p_{\bullet j}$$

dove $p_{i\bullet} = \sum_j p_{ij}$ e $p_{\bullet j} = \sum_i p_{ij}$ sono le marginali vere (in pratica stimate da $n_{i\bullet}/n$ e $n_{\bullet j}/n$).

Per $n \rightarrow \infty$, il teorema limite centrale multivariato afferma che le variabili standardizzate:

$$U_{ij} = (N_{ij} - n p_{ij}^0) / \sqrt{n p_{ij}^0}$$

convergono in distribuzione a una normale multivariata. La statistica χ^2 è la forma quadratica:

$$\chi^2 = \sum_i \sum_j U_{ij}^2$$

B.2 Il rango della matrice di varianza-covarianza

Le variabili U_{ij} non sono indipendenti a causa dei vincoli marginali. I vincoli sono:

$$\sum_j N_{ij} = n_{i\bullet} \text{ per ogni } i = 1, \dots, r$$

$$\sum_i N_{ij} = n_{\bullet j} \text{ per ogni } j = 1, \dots, c$$

$$\sum_i \sum_j N_{ij} = n$$

Questi $r + c$ vincoli non sono tutti indipendenti: la loro somma produce $\sum_i n_{i\bullet} = \sum_j n_{\bullet j} = n$, il che significa che soltanto $r + c - 1$ vincoli sono linearmente indipendenti.

La dimensione effettiva dello spazio libero è dunque:

$$rc - (r + c - 1) = rc - r - c + 1 = (r - 1)(c - 1)$$

La matrice di varianza-covarianza delle U_{ij} ha rango $(r - 1)(c - 1)$, e la distribuzione limite di $\chi^2 = \sum U_{ij}^2$ è quella di una somma di $(r - 1)(c - 1)$ quadrati di normali standard indipendenti, cioè una chi-quadrato con $(r - 1)(c - 1)$ gradi di libertà. La dimostrazione formale richiede di diagonalizzare la matrice di varianza-covarianza e verificare che abbia esattamente $(r - 1)(c - 1)$ autovalori uguali a 1 e gli altri nulli.

B.3 La statistica del rapporto di verosimiglianza G^2

Un'alternativa alla statistica χ^2 di Pearson è la statistica del rapporto di verosimiglianza (likelihood ratio statistic), anche chiamata G^2 o statistica G :

$$G^2 = 2 \sum_i \sum_j n_{ij} \cdot \ln(n_{ij} / e_{ij})$$

Essa ha la stessa distribuzione limite $\chi^2_{(r-1)(c-1)}$ sotto H_0 , ma le sue proprietà in campioni finiti differiscono da χ^2 . La statistica G^2 ha una derivazione naturale dalla

teoria dell'informazione: essa è proporzionale alla divergenza di Kullback-Leibler tra la distribuzione osservata e la distribuzione attesa sotto H_0 :

$$D_{KL}(p_{obs} || p_{exp}) = \sum_i \sum_j f_{ij} \cdot \ln(f_{ij} / (f_{i\bullet} \cdot f_{\bullet j}))$$

e $G^2 = 2n \cdot D_{KL}(p_{obs} || p_{exp})$. La divergenza KL è sempre non-negativa (per la disuguaglianza di Jensen applicata alla funzione logaritmo, che è concava), ed è uguale a zero se e soltanto se $f_{ij} = f_{i\bullet} \cdot f_{\bullet j}$ per ogni (i, j) — cioè se e soltanto se le variabili sono indipendenti. Questo fornisce un'interpretazione informazione-teorica della statistica G^2 : essa misura la distanza informazionale tra la distribuzione osservata e la distribuzione di indipendenza.

B.4 La correlazione di rango di Spearman e Kendall come misure di contingenza ordinale

Quando le modalità delle variabili hanno un ordine naturale, le misure di associazione basate sul χ^2 perdono informazione — esse trattano le categorie come nominali. In questo caso, le misure di correlazione di rango sono più appropriate.

La correlazione di Spearman r tra due variabili ordinali X e Y è la correlazione di Pearson applicata ai ranghi:

$$r = 1 - (6 \sum_i d_i^2) / (n(n^2 - 1))$$

dove $d_i = \text{rank}(x_i) - \text{rank}(y_i)$ è la differenza tra i ranghi della i -esima osservazione nelle due variabili. La formula esatta si applica in assenza di ex aequo; in presenza di ex aequo si utilizza la formula generale basata sulle covarianze dei ranghi.

Il τ di Kendall misura l'associazione mediante la concordanza delle coppie:

$$\tau = (nc - nd) / \sqrt{((nc + nd + tx)(nc + nd + ty))}$$

dove nc è il numero di coppie concordanti ($x_i > x_j$ e $y_i > y_j$, o viceversa), nd è il numero di coppie discordanti, e tx , ty sono i fattori di correzione per gli ex aequo. Il τ di Kendall ha un'interpretazione probabilistica diretta: $\tau = P(\text{concordanza}) - P(\text{discordanza})$, dove la probabilità è calcolata su una coppia di osservazioni scelta a caso.

Appendice C — Il processo di Ornstein-Uhlenbeck e la sua applicazione evolutiva

C.1 Definizione e proprietà del processo OU

Il processo di Ornstein-Uhlenbeck è definito dall'equazione stocastica differenziale:

$$dX_t = \alpha(\theta - X_t) dt + \sigma dW_t$$

dove W_t è un moto browniano standard, θ è il valore ottimale (attrattore), $\alpha > 0$ è la forza di attrazione (tasso di ritorno verso la media), e σ è la volatilità del rumore. La soluzione esplicita è:

$$X_t = X_0 e^{-\alpha t} + \theta(1 - e^{-\alpha t}) + \sigma \int_0^t e^{-\alpha(t-s)} dW_s$$

La parte stocastica è un integrale di Itô di un processo deterministico contro il moto browniano. Per t grande ($t \gg 1/\alpha$), il termine iniziale $X_0 e^{-\alpha t} \rightarrow 0$ e il processo converge alla sua distribuzione stazionaria.

La distribuzione stazionaria è normale:

$$X_\infty \sim N(\theta, \sigma^2/(2\alpha))$$

con media θ e varianza $\sigma^2/(2\alpha)$. La varianza stazionaria è determinata dal rapporto tra la volatilità del rumore (σ^2) e la forza di attrazione (2α): un attrattore forte (α grande) produce una varianza piccola (il processo è concentrato intorno a θ); un attrattore debole (α piccolo) o un rumore forte (σ grande) producono una varianza grande.

C.2 Covarianza e correlazione nel tempo

La struttura di covarianza del processo OU è:

$$\text{Cov}(X_t, X_s) = (\sigma^2/(2\alpha)) \cdot e^{-\alpha|t-s|}$$

La correlazione tra valori del processo a tempi diversi decade esponenzialmente con la distanza temporale, con tempo di correlazione $\tau_c = 1/\alpha$. Valori del processo a distanza temporale $\gg 1/\alpha$ sono quasi incorrelati.

Nella biologia evolutiva, il processo OU modella l'evoluzione di un tratto fenotipico soggetto a selezione stabilizzante (che mantiene il tratto vicino a un valore ottimale θ) e a deriva stocastica (che produce variazioni casuali intorno all'optimum). Il tempo di correlazione $1/\alpha$ misura la «memoria» evolutiva: due specie separate da un tempo evolutivo $t \gg 1/\alpha$ avranno tratti indipendenti, mentre specie separate da $t \ll 1/\alpha$ avranno tratti fortemente correlati (a causa della loro discendenza comune recente).

C.3 Il confronto tra modelli BM e OU in filogenetica comparata

Il modello browniano (BM) e il modello di Ornstein-Uhlenbeck (OU) rappresentano due ipotesi contrastanti sulla struttura dell'evoluzione fenotipica.

Sotto BM, la varianza del tratto cresce indefinitamente con il tempo:

$$\text{Var}(X_t | X_0) = \sigma^2_{\text{BM}} \cdot t$$

Il tratto può allontanarsi arbitrariamente dall'ancestore: non vi è attrazione verso un optimum, e la deriva è pura (nessuna selezione stabilizzante). Questo corrisponde a un paesaggio adattativo piatto — alla tesi gouldiana di contingenza radicale.

Sotto OU, la varianza si avvicina asintoticamente alla varianza stazionaria:

$$\text{Var}(X_t | X_0) = (\sigma^2/(2\alpha))(1 - e^{-2\alpha t}) \rightarrow \sigma^2/(2\alpha) \text{ per } t \rightarrow \infty$$

Il tratto è vincolato intorno all'optimum θ : a tempi lunghi, la distribuzione del tratto non dipende più dalla posizione iniziale X_0 . Questo corrisponde a un paesaggio adattativo con un picco prominente — alla tesi di Conway Morris di convergenza verso soluzioni ottimali.

Il confronto tra i due modelli mediante AIC si basa sul log-verosimiglianza. Per un insieme di n specie con tratti osservati $x = (x_1, \dots, x_n)$ e albero filogenetico con matrice di covarianza C :

$$\text{Sotto BM: } \log L_{\text{BM}} = -(n/2) \log(2\pi) - (1/2) \log|\sigma^2_{\text{BM}} C| - (1/(2\sigma^2_{\text{BM}})) (x - \mu 1)^T C^{-1} (x - \mu 1)$$

$$\text{Sotto OU: } \log L_{\text{OU}} = -(n/2) \log(2\pi) - (1/2) \log|\Sigma_{\text{OU}}| - (1/2) (x - \theta 1)^T \Sigma_{\text{OU}}^{-1} (x - \theta 1)$$

dove Σ_{OU} ha entrate $\Sigma_{ij} = (\sigma^2/(2\alpha)) \exp(-\alpha \cdot t_{ij})$, con t_{ij} la lunghezza del ramo condiviso tra specie i e j .

$$\text{AIC} = -2 \log L + 2k$$

dove k è il numero di parametri liberi (BM: $\sigma^2, \mu \rightarrow k=2$; OU: $\sigma^2, \alpha, \theta \rightarrow k=3$). Il modello con AIC minore è preferito; la differenza $\Delta AIC > 2$ è convenzionalmente interpretata come evidenza sostanziale a favore del modello con AIC minore.

Appendice D — Informazione mutua, entropia e misure di dipendenza

D.1 L'entropia di Shannon e le sue proprietà

Per una variabile casuale discreta X con distribuzione $P(X = x_i) = p_i$, l'entropia di Shannon è:

$$H(X) = -\sum_i p_i \log_2 p_i$$

(usando la convenzione $0 \cdot \log 0 = 0$). L'entropia misura l'incertezza media sulla variabile X : è massima quando tutte le modalità sono equiprobabili ($H = \log_2 r$ per una variabile con r modalità), e minima ($H = 0$) quando una modalità ha probabilità 1.

L'entropia congiunta di (X, Y) è:

$$H(X, Y) = -\sum_i \sum_j P(x_i, y_j) \log_2 P(x_i, y_j)$$

L'entropia condizionale di X dato Y è:

$$H(X | Y) = H(X, Y) - H(Y) = -\sum_i \sum_j P(x_i, y_j) \log_2 P(x_i | y_j)$$

L'entropia condizionale $H(X | Y) \leq H(X)$, con uguaglianza se e soltanto se X e Y sono indipendenti. La conoscenza di Y non può aumentare l'incertezza su X .

D.2 L'informazione mutua come misura di dipendenza

L'informazione mutua $I(X; Y)$ misura la riduzione dell'incertezza su X prodotta dalla conoscenza di Y :

$$I(X; Y) = H(X) - H(X | Y) = H(Y) - H(Y | X) = H(X) + H(Y) - H(X, Y)$$

L'informazione mutua è simmetrica ($I(X; Y) = I(Y; X)$), non-negativa ($I(X; Y) \geq 0$), e uguale a zero se e soltanto se X e Y sono indipendenti. Essa è legata alla divergenza di Kullback-Leibler:

$$\begin{aligned} I(X; Y) &= D_{KL}(P_{\{XY\}} || P_X \otimes P_Y) \\ &= \sum_i \sum_j P(x_i, y_j) \log_2 [P(x_i, y_j) / (P(x_i) P(y_j))] \end{aligned}$$

In termini operativi: $I(X; Y) = 0$ corrisponde all'indipendenza statistica — alla contingenza pura nel senso statistico; $I(X; Y) = H(X) = H(Y)$ corrisponde alla dipendenza deterministica — alla necessità statistica.

D.3 Il coefficiente di informazione mutua normalizzato (NMI)

Per confrontare $I(X; Y)$ tra coppie di variabili con diversi livelli di entropia, si utilizza il coefficiente di informazione mutua normalizzato:

$$NMI(X; Y) = I(X; Y) / \sqrt{H(X) \cdot H(Y)}$$

oppure la versione basata sulla media aritmetica:

$$NMI_a(X; Y) = 2 I(X; Y) / (H(X) + H(Y))$$

entrambe con valori in $[0, 1]$. $NMI = 0$ corrisponde all'indipendenza, $NMI = 1$ alla dipendenza deterministica. Il NMI è l'analogo informazione-teorico del V di Cramér,

e le due misure sono asintoticamente correlate per variabili con molte modalità e grandi campioni.

D.4 Il collegamento con il continuum $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$

La funzione di grado di necessità $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$ proposta nel Capitolo V può essere espressa in termini di NMI in modo preciso per il caso statistico. Dato un evento E e un insieme di condizioni $C = \{C_1, \dots, C_k\}$ (il contesto di condizionamento Δ):

$$N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta) = NMI(E; C_1, \dots, C_k \mid \text{Contesto}_\Sigma) \\ = I(E; C_1, \dots, C_k \mid \text{Contesto}_\Sigma) / H(E \mid \text{Contesto}_\Sigma)$$

Questa espressione cattura:

- (i) La dipendenza dalla profondità dell'analisi Γ : aggiungere condizioni al vettore $C_1, \dots, C_k$ aumenta (o al più non diminuisce) $I(E; C \mid \Sigma)$, aumentando N . Ciò corrisponde alla tesi leibniziana che un'analisi più profonda rivela più necessità.
- (ii) La dipendenza dalla scala di osservazione Σ : il contesto Σ seleziona quali fenomeni sono rilevanti alla scala considerata, modificando sia $H(E \mid \Sigma)$ che $I(E; C \mid \Sigma)$.
- (iii) La dipendenza dal contesto di condizionamento Δ : variare l'insieme delle condizioni $C_1, \dots, C_k$ cambia I e dunque N — il paradosso di Simpson è il caso in cui un'estensione di Δ provoca un cambiamento di segno nella correlazione effettiva, con effetti non monotoni su N .

Appendice E — Sintesi: i sei tipi di necessità attraverso i domini

Il percorso del saggio ha identificato sei tipi distinti di necessità, ciascuno con una struttura propria, un dominio privilegiato di applicazione e un profilo caratteristico nel continuum $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta)$. La tabella seguente li riassume in forma comparativa.

Tipo 1 — Necessità logica assoluta (Leibniz)

Dominio: Verità di ragione, identità logiche ($A = A$), contraddizioni.

Struttura: La negazione produce contraddizione. Dimostrabile in un numero finito di passi analitici.

Profilo nel continuum: $N = 1$ per definizione, indipendente da Γ, Σ, Δ . È il polo superiore ideale del gradiente.

Limite principale: Non spiega la struttura necessaria di oggetti reali scoperti empiricamente (acqua = H_2O non è logicamente necessario a priori).

Tipo 2 — Necessità della contingenza (Meillassoux)

Dominio: Meta-ontologia; il principio di fatticità $PF = \Box(\forall x \Diamond(x \text{ è altrimenti}))$.

Struttura: Necessità di secondo ordine: ogni ente è contingente, e questo è necessariamente vero. Opera a livello delle leggi stesse, non dei fenomeni entro le leggi.

Profilo nel continuum: $N(\text{Contingenza}, \Gamma, \Sigma, \Delta) = 1$ al livello meta; $N(\text{ogni legge/fatto}, \infty, \Sigma, \Delta) < 1$.

Limite principale: Richiede una logica modale di ordine superiore non sviluppata; vulnerabile alle obiezioni di Hallward (scivolamento epistemico-ontologico), Brassier (possibilismo senza spazio modale fondato) e Gratton (circolarità nell'uso dell'assiomatica cantoriana).

Tipo 3 — Necessità statistica del condizionamento

Dominio: Associazioni statistiche, effetti causali in grafici DAG di Pearl.

Struttura: $P(E \mid \text{do}(C)) > P(E \mid \neg C)$ in modo robusto ai confounder; $I(E; C \mid \Sigma) / H(E \mid \Sigma)$ alto.

Profilo nel continuum: $N(E, \Gamma, \Sigma, \Delta) = \text{NMI}(E; C \mid \Sigma)$; aumenta con Γ (variabili di controllo aggiuntive); non monotona in Σ e Δ (paradosso di Simpson).

Limite principale: Relativa al contesto (paradosso di Simpson); non assoluta; richiede identificazione causale che non emerge dalla sola associazione.

Tipo 4 — Necessità emergente per aggregazione

Dominio: Termodinamica (Jaynes/Gibbs), morfologie convergenti (Conway Morris/McGhee) — entrambi formalmente come $\text{argmax}_m F(m)$ soggetto a $C(m)$.

Struttura: Deviazioni dalla distribuzione ottimale hanno probabilità $\rightarrow 0$ per $N \rightarrow \infty$ (termodinamica); morfologie non ottimali sono selezionate negativamente su scale temporali lunghe (biologia).

Profilo nel continuum: $N(E, \Gamma, \Sigma \rightarrow \text{macro}, \Delta) \rightarrow 1$ per N grande o T lungo; basso per $\Sigma = \text{scala microscopica/breve}$.

Limite principale: Non assoluta per N finito o T breve; dipende dalla scala Σ ; il parallelismo formale tra i due domini mostra che si tratta di una struttura unificata, non di due fenomeni separati.

Tipo 5 — Necessità essenziale a posteriori (Kripke)

Dominio: Identità di sostanze naturali e designatori rigidi (biologia: essenza morfologica delle strutture convergenti; fisica quantistica: pointer basis; statistica: relazioni causali reali nel DAG).

Struttura: $\Box(P(t))$ scoperto a posteriori ma vero in tutti i mondi in cui t esiste con la sua struttura essenziale. Soddisfa le condizioni (a) empirica nell'accesso, (b) necessaria nella struttura, (c) indipendente da Γ, Σ, Δ .

Profilo nel continuum: $N(P(t), \Gamma, \Sigma, \Delta) = 1$ per qualsiasi Γ, Σ, Δ quando P è essenziale; la condizione (v) del §5.2/§5.6 lo formalizza.

Limite principale: Richiede identificazione empirica dell'essenza; non generalizzabile a priori; dipende da una ontologia degli oggetti reali (non dei concetti) che Leibniz non aveva sviluppato.

Tipo 6 — Necessità nomologica della distribuzione quantistica

Dominio: Meccanica quantistica; regola di Born; leggi di conservazione della QED e del Modello Standard.

Struttura: Singoli eventi contingenti; distribuzione necessaria secondo regola di Born. Le leggi stesse sono nomologicamente stabili con una precisione verificabile sperimentalmente fino alla decima cifra decimale.

Profilo nel continuum: $N(\text{distribuzione}, \Gamma, \Sigma \rightarrow \text{statistico}, \Delta) = 1$; $N(\text{singolo evento}, \Gamma, \Sigma, \Delta) \ll 1$. Si distingue dal tipo 2 (Meillassoux) perché la contingenza degli eventi opera entro leggi stabili, non a livello delle leggi stesse.

Limite principale: Non si estende alle leggi stesse nel senso meillassouxiano; la stabilità nomologica osservata non è necessità logica assoluta ma evidenza empirica di robustezza che l'argomento cantoriano non può neutralizzare del tutto senza ricorrere a uno spazio di probabilità definito.

Relazioni tra i sei tipi

I sei tipi non sono indipendenti: formano una struttura di implicazioni e esclusioni. Il tipo 1 (logico) implica il tipo 5 (essenziale) solo nella misura in cui le essenze degli

oggetti siano analiticamente derivabili dai loro concetti — il che Kripke nega. Il tipo 4 (aggregazione) è una forma debole del tipo 1 nel limite $N \rightarrow \infty$: si avvicina asintoticamente alla necessità assoluta senza raggiungerla. Il tipo 2 (Meillassoux) si oppone al tipo 1, al tipo 4 e al tipo 5, ma non riesce a intaccare il tipo 5 per le ragioni esposte nel §2.5. I tipi 3 e 6 sono strutturalmente affini (entrambi probabilistici) ma operano a livelli diversi: il tipo 3 riguarda le associazioni tra variabili, il tipo 6 riguarda la distribuzione dei risultati delle misure.

La distinzione necessario/contingente non è dunque una distinzione binaria tra due classi, né un semplice continuum monodimensionale: è una struttura a sei dimensioni in cui i diversi tipi di necessità si sovrappongono, confliggono e si integrano in modi che dipendono dal dominio, dalla scala di osservazione e dalla postura epistemica dell'osservatore.

Bibliografia

Fonti primarie

Leibniz, G.W. (1686). *Discours de métaphysique*. In: Gerhardt, C.I. (ed.), *Die philosophischen Schriften von Gottfried Wilhelm Leibniz*, vol. IV. Weidmann, Berlin 1880.

Leibniz, G.W. (1710). *Essais de Théodicée sur la bonté de Dieu, la liberté de l'homme et l'origine du mal*. Amsterdam.

Leibniz, G.W. (1714). *Monadologie*. Prima pubblicazione postuma in traduzione tedesca: *Lehrsätze über die Monadologie* (1720). Testo francese in: Gerhardt, *op. cit.*, vol. VI.

Leibniz, G.W. (1714). *Principes de la nature et de la grâce fondés en raison*. In: Gerhardt, *op. cit.*, vol. VI.

Leibniz, G.W. – Arnauld, A. (1686–1690). *Correspondance*. In: Gerhardt, *op. cit.*, vol. II. Trad. it. di R. Arrighi: *Carteggio con Arnauld*. Laterza, Bari 1993.

Meillassoux, Q. (2006). *Après la finitude: Essai sur la nécessité de la contingence*. Seuil, Paris. Trad. ingl. di R. Brassier: *After Finitude: An Essay on the Necessity of Contingency*. Continuum, London–New York 2008.

Gould, S.J. (1989). *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*. W.W. Norton, New York.

Conway Morris, S. (2003). *Life's Solution: Inevitable Humans in a Lonely Universe*. Cambridge University Press, Cambridge.

Letteratura secondaria filosofica

Adams, R.M. (1994). *Leibniz: Determinist, Theist, Idealist*. Oxford University Press, New York–Oxford.

Badiou, A. (1988). *L'Être et l'événement*. Seuil, Paris. Trad. it. di G. Tarolo: *L'essere e l'evento*. Il Melangolo, Genova 1995.

Badiou, A. (2006). Préface, in: Meillassoux, Q., *Après la finitude*, pp. 5–11.

Jolley, N. (ed.) (1994). *The Cambridge Companion to Leibniz*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Brassier, R.** (2007). *Nihil Unbound: Enlightenment and Extinction*. Palgrave Macmillan, London. [Contiene lettura critica di Meillassoux nei capitoli finali, con particolare attenzione al problema della possibilità senza spazio modale definito.]
- Gratton, P.** (2014). *Speculative Realism: Problems and Prospects*. Bloomsbury, London. [Cap. 3: rassegna sistematica delle obiezioni ad *Après la finitude*, inclusa la questione dell'assiomatica cantoriana.]
- Hallward, P.** (2011). Anything is Possible: A Reading of Quentin Meillassoux's *After Finitude*. In: Bryant, L. – Srnicek, N. – Harman, G. (eds.), *The Speculative Turn: Continental Materialism and Realism*. re.press, Melbourne, pp. 130–141.
- Kripke, S.** (1980). *Naming and Necessity*. Harvard University Press, Cambridge (MA). Edizione riveduta e ampliata delle lezioni Princeton del 1970 pubblicate in: Davidson, D. – Harman, G. (eds.), *Semantics of Natural Language*. Reidel, Dordrecht 1972, pp. 253–355.
- Putnam, H.** (1973). Meaning and Reference. *Journal of Philosophy*, 70(19), pp. 699–711. [Esperimento mentale di Twin Earth, complementare all'analisi kripkiana dei designatori rigidi.]
- Lewis, D.** (1986). *On the Plurality of Worlds*. Blackwell, Oxford.
- Mates, B.** (1986). *The Philosophy of Leibniz: Metaphysics and Language*. Oxford University Press, New York–Oxford.
- Pearl, J.** (2000). *Causality: Models, Reasoning, and Inference*. Cambridge University Press, Cambridge. Seconda edizione 2009.
- Priest, G.** (2006). In *Contradiction: A Study of the Transconsistent*. Seconda edizione ampliata (prima ed. 1987). Oxford University Press, Oxford.
- Priest, G.** (2008). *An Introduction to Non-Classical Logic: From If to Is*. Seconda edizione. Cambridge University Press, Cambridge.

Logica modale e semantica dei mondi possibili

- Chellas, B.F.** (1980). *Modal Logic: An Introduction*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kripke, S.** (1963). Semantical Considerations on Modal Logic. *Acta Philosophica Fennica*, 16, pp. 83–94.
- Williamson, T.** (2013). *Modal Logic as Metaphysics*. Oxford University Press, Oxford.

Letteratura biologica ed evolutivista

- Briggs, D.E.G. – Erwin, D.H. – Collier, F.J.** (1994). *The Fossils of the Burgess Shale*. Smithsonian Institution Press, Washington.
- Losos, J.B.** (2011). Convergence, Adaptation, and Constraint. *Evolution*, 65(7), pp. 1827–1840.
- McGhee, G.R.** (2011). *Convergent Evolution: Limited Forms Most Beautiful*. MIT Press, Cambridge (MA).
- Pagel, M.** (1999). Inferring the Historical Patterns of Biological Evolution. *Nature*, 401, pp. 877–884.
- Revell, L.J.** (2012). phytools: An R Package for Phylogenetic Comparative Biology (and Other Things). *Methods in Ecology and Evolution*, 3(2), pp. 217–223.

Statistica e teoria dell'informazione

- Fisher, R.A.** (1922). On the Interpretation of χ^2 from Contingency Tables, and the Calculation of P. *Journal of the Royal Statistical Society*, 85(1), pp. 87–94.
- Jaynes, E.T.** (1957). Information Theory and Statistical Mechanics. *Physical Review*, 106(4), pp. 620–630.
- Pearson, K.** (1900). On the Criterion that a Given System of Deviations from the Probable in the Case of a Correlated System of Variables Is Such That It Can Be Reasonably Supposed to Have Arisen from Random Sampling. *Philosophical Magazine*, Series 5, 50(302), pp. 157–175.
- Shannon, C.E.** (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), pp. 379–423 e 27(4), pp. 623–656.
- Simpson, E.H.** (1951). The Interpretation of Interaction in Contingency Tables. *Journal of the Royal Statistical Society*, Series B, 13(2), pp. 238–241.

Meccanica statistica e termodinamica

- Gibbs, J.W.** (1902). *Elementary Principles in Statistical Mechanics*. Yale University Press, New Haven.
- Jaynes, E.T.** (1965). Gibbs vs Boltzmann Entropies. *American Journal of Physics*, 33(5), pp. 391–398.

Meccanica quantistica e fondamenti

- Aspect, A. – Grangier, P. – Roger, G.** (1982). Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities. *Physical Review Letters*, 49(2), pp. 91–94.
- Bell, J.S.** (1964). On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics*, 1(3), pp. 195–200.
- Hanneke, D. – Fogwell, S. – Gabrielse, G.** (2008). New Measurement of the Electron Magnetic Moment and the Fine Structure Constant. *Physical Review Letters*, 100(12), 120801. [Verificazione sperimentale della costante di struttura fine a dodici cifre significative, citata nel confronto con l'ipercaos meillassouxiano nel §6.9.] Ristampato in: Bell, J.S., *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge 1987.
- Everett, H.** (1957). "Relative State" Formulation of Quantum Mechanics. *Reviews of Modern Physics*, 29(3), pp. 454–462.
- von Neumann, J.** (1932). *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Springer, Berlin. Trad. ingl. di R. Beyer: *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton University Press, Princeton 1955.
- Wallace, D.** (2012). *The Emergent Multiverse: Quantum Theory according to the Everett Interpretation*. Oxford University Press, Oxford.
- Zurek, W.H.** (1991). Decoherence and the Transition from Quantum to Classical. *Physics Today*, 44(10), pp. 36–44.
- Zurek, W.H.** (2003). Decoherence, Einselection, and the Quantum Origins of the Classical. *Reviews of Modern Physics*, 75(3), pp. 715–775.

Sistemi dinamici e teoria delle probabilità

Arnold, L. (1974). *Stochastic Differential Equations: Theory and Applications*. Wiley, New York.

Uhlenbeck, G.E. – Ornstein, L.S. (1930). On the Theory of the Brownian Motion. *Physical Review*, 36(5), pp. 823–841.

Wright, S. (1932). The Roles of Mutation, Inbreeding, Crossbreeding and Selection in Evolution. *Proceedings of the Sixth International Congress of Genetics*, vol. 1, pp. 356–366.

Integrazioni bibliografiche per le sette espansioni

Sezione I — Il vuoto tra Leibniz e Meillassoux

Armstrong, D.M. (1978). *A Theory of Universals*, 2 voll. Cambridge University Press, Cambridge.

Armstrong, D.M. (1983). *What is a Law of Nature?* Cambridge University Press, Cambridge.

Bird, A. (2007). *Nature's Metaphysics: Laws and Properties*. Oxford University Press, Oxford.

Dretske, F. (1977). Laws of Nature. *Philosophy of Science*, 44(2), pp. 248–268.

Hume, D. (1739–40). *A Treatise of Human Nature*. Ed. L.A. Selby-Bigge. Oxford University Press, Oxford 1888.

Hume, D. (1748). *An Enquiry Concerning Human Understanding*. Ed. T.L. Beauchamp. Oxford University Press, Oxford 1999.

Lewis, D. (1973). *Counterfactuals*. Blackwell, Oxford.

Lewis, D. (1994). Humean Supervenience Debugged. *Mind*, 103(412), pp. 473–490.

Mumford, S. (2004). *Laws in Nature*. Routledge, London.

Tooley, M. (1977). The Nature of Laws. *Canadian Journal of Philosophy*, 7(4), pp. 667–698.

Sezione II — Kolmogorov, complessità algoritmica e contingenza formale

Chaitin, G.J. (1966). On the Length of Programs for Computing Finite Binary Sequences. *Journal of the ACM*, 13(4), pp. 547–569.

Chaitin, G.J. (1987). *Algorithmic Information Theory*. Cambridge University Press, Cambridge.

Kolmogorov, A.N. (1965). Three Approaches to the Quantitative Definition of Information. *Problems of Information Transmission*, 1(1), pp. 1–7.

Li, M. — Vitányi, P. (2008). *An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications*. 3a ed. Springer, New York.

Martin-Löf, P. (1966). The Definition of Random Sequences. *Information and Control*, 9(6), pp. 602–619.

Solomonoff, R. (1964). A Formal Theory of Inductive Inference. *Information and Control*, 7(1–2), pp. 1–22 e 224–254.

Sezione III — Rotture di simmetria

Anderson, P.W. (1972). More is Different. *Science*, 177(4047), pp. 393–396.

Goldstone, J. (1961). Field Theories with Superconductor Solutions. *Il Nuovo Cimento*, 19(1), pp. 154–164.

Nambu, Y. — Jona-Lasinio, G. (1961). Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity. *Physical Review*, 122(1), pp. 345–358.

Strocchi, F. (2012). *Symmetry Breaking*. 3a ed. Springer, Heidelberg.

Sezione IV — Evo-devo

Carroll, S.B. (2005). *Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo*. W.W. Norton, New York.

Müller, G.B. — Wagner, G.P. (1991). Novelty in Evolution: Restructuring the Concept. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 22, pp. 229–256.

Waddington, C.H. (1957). *The Strategy of the Genes*. Allen and Unwin, London.

Wagner, A. (2011). *The Origins of Evolutionary Innovations: A Theory of Transformative Change in Living Systems*. Oxford University Press, Oxford.

Wagner, G.P. — Altenberg, L. (1996). Perspective: Complex Adaptations and the Evolution of Evolvability. *Evolution*, 50(3), pp. 967–976.

Sezione V — Tradizione continentale

Bergson, H. (1907). *L'Évolution créatrice*. Alcan, Paris. Trad. it. di F. Polidori: *L'evoluzione creatrice*. Raffaello Cortina, Milano 2002.

Deleuze, G. (1968). *Différence et répétition*. PUF, Paris. Trad. it. di G. Guglielmi: *Differenza e ripetizione*. Raffaello Cortina, Milano 1997.

Deleuze, G. (1969). *Logique du sens*. Minuit, Paris. Trad. it. di M. de Stefanis: *Logica del senso*. Feltrinelli, Milano 1975.

Heidegger, M. (1927). *Sein und Zeit*. Max Niemeyer, Halle. Trad. it. di P. Chiodi: *Essere e tempo*. Longanesi, Milano 1970.

Luhmann, N. (1984). *Soziale Systeme: Grundriss einer allgemeinen Theorie*. Suhrkamp, Frankfurt am Main. Trad. it. di A. Febbrajo e R. Schmidt: *Sistemi sociali: Fondamenti di una teoria generale*. Il Mulino, Bologna 1990.

Sartre, J.-P. (1943). *L'Être et le néant*. Gallimard, Paris. Trad. it. di G. Del Bo: *L'essere e il nulla*. Il Saggiatore, Milano 1965.

Sezione VI — Metafisica delle leggi di natura

Beebe, H. — Hitchcock, C. — Menzies, P. (eds.) (2009). *The Oxford Handbook of Causation*. Oxford University Press, Oxford. [Capp. 10–15 sulla metafisica delle leggi.]

Carroll, J.W. (1994). *Laws of Nature*. Cambridge University Press, Cambridge.

Cartwright, N. (1983). *How the Laws of Physics Lie*. Oxford University Press, Oxford.

van Fraassen, B.C. (1989). *Laws and Symmetry*. Oxford University Press, Oxford.

Sezione VII — Gödel e la contingenza dell'aritmetica

Chaitin, G.J. (2005). *Meta Math! The Quest for Omega*. Pantheon Books, New York.

Trad. it. di L. Sosio: *Alla ricerca di Omega*. Adelphi, Milano 2007.

Franzén, T. (2005). *Gödel's Theorem: An Incomplete Guide to Its Use and Abuse*. A.K. Peters, Wellesley (MA).

Gödel, K. (1931). Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. *Monatshefte für Mathematik und Physik*, 38, pp. 173–198.

Trad. ingl. in: van Heijenoort, J. (ed.), *From Frege to Gödel: A Source Book in Mathematical Logic*. Harvard University Press, Cambridge (MA) 1967.

Lucas, J.R. (1961). Minds, Machines and Gödel. *Philosophy*, 36(137), pp. 112–127.

Smullyan, R. (1992). *Gödel's Incompleteness Theorems*. Oxford University Press, New York.